



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**RAMO DE TERMOTECNIA**

**Disciplina**

**ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**TEMA:**

**ESTUDO DE DIMENSIONAMENTO SIMPLIFICADO DE SISTEMA  
DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO**

**Discente: Issufo Momade Sumalgy**

**Supervisores: Prof. Dr. Eng.º Boaventura Chongo Cuamba**

**Eng.º Freitas Garrine**

**INDICE**

<b>CAPITULO 1 .....</b>	<b>3</b>
1. Introdução .....	3
1.1 Conceitos Teóricos .....	3
1.2 Principais Tecnologias de Energias Renováveis .....	5
1.2.1 Energia Solar .....	5
1.2.2 Energia Eólica .....	6
1.2.3 Energia Hídrica .....	7
1.2.4 Energia do Biogás .....	8
1.3 Princípios Científicos das Energias Renováveis .....	8
1.3.1 Características Dinâmicas .....	8
1.3.2 Qualidade de Abastecimento .....	8
1.3.4 Dispersão Versus Centralização da Energia .....	9
1.4 Aplicações de Energias Renováveis .....	9
<b>CAPITULO 2 .....</b>	<b>11</b>
2 Introdução .....	11
2.1 Radiação Solar Electromagnética .....	11
2.2 Absorção e Emissão de Radiação por Moléculas .....	13
2.3 Descrição Quantitativa da Radiação .....	16
2.4 Leis de Radiação (Para Corpos Negros) .....	17
2.5 Distribuição da Radiação .....	21
2.6 Radiação Solar Incidente .....	23
2.7 Radiação Terrestre .....	29
2.8 Medidas de Radiação .....	31
<b>CAPITULO 3 .....</b>	<b>32</b>
3. Introdução .....	32
3.1 Efeito fotovoltaico .....	33
3.2 Tipos de Células .....	35
3.2.1 Silício Monocristalino .....	35
3.2.2 Silício Policristalino .....	37
3.2.3 Silício Amorfo .....	38
3.3 Módulos Fotovoltaicos .....	38
3.3.1 Características eléctricas dos módulos fotovoltaicos .....	41
3.4 Descrição Elétrica .....	41

---

3.4.1	Gerador Fotovoltáico Ideal .....	41
3.4.2	Gerador Fotovoltáico Real .....	45
3.5	Efeitos dos Aparelhos de Medida na Determinação de I e V .....	47
3.5.1	Factores que afectam as características eléctricas dos módulos	
	49	
3.5.2	Alguns modelos de módulos fotovoltaicos .....	50
3.6	Componentes de um Sistema Fotovoltáico .....	51
3.6.1	Sistemas Isolados .....	52
3.6.2	Sistemas Híbridos .....	53
3.6.3	Sistemas Interligados a Rede .....	54
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>.....</b>	<b>55</b>
4	Dimensionamento do Sistema de Bombeamento de Água .....	55
4.1	Introdução .....	55
4.2	Metodologia Simplificada de Dimensionamento de Sistemas de	
	Bombeamento Fotovoltáico .....	56
4.2.1	Metodologia de Cálculo da Energia e da Potência Hidráulica .....	56
4.2.2	Metodologia de Cálculo dos Parâmetros Fotovoltáicos .....	57
4.2.3	Tratamento de Dados .....	59
5	Conclusão .....	60
6	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA .....	61

## **CAPITULO 1**

### **1. Introdução**

A utilização das energias renováveis em substituição aos combustíveis fósseis é uma opção viável e vantajosa [1]. Pois, para além de serem praticamente inesgotáveis, estas apresentam um impacto ambiental muito baixo ou quase nulo, sem afectar o balanço térmico ou a composição atmosférica do planeta [1]. Graças aos diversos tipos de manifestação, disponibilidade de larga abrangência geográfica e variadas possibilidades de conversão, as energias renováveis são bastante próprias para geração distribuída e ou autónoma [1].

O desenvolvimento da tecnologia, para o aproveitamento das energias renováveis poderá beneficiar comunidades rurais e regiões afastadas bem como a produção agrícola através de autonomia energética e consequente melhoria global da qualidade de vida dos habitantes [2].

#### **1.1 Conceitos Teóricos**

O termo “energia” representa um conceito introduzido no século XIX para permitir uma abordagem científica unificada de vários fenómenos relacionados envolvendo trabalho, calor e temperatura [1]. A energia não é um objecto, nem um fluído, nem qualquer outra coisa que possa ser isolada e identificada separadamente, mas sim uma propriedade da matéria [1]. Existe um acentuado contraste entre os métodos desenvolvidos para as energias renováveis em relação aos utilizados para as energias não renováveis bem com combustíveis fósseis e energia nuclear [1]. A necessidade do aproveitamento dos recursos de energias renováveis é patente visto que os combustíveis fósseis (especialmente óleo) estão cada vez mais caros, a população mundial está a aumentar e cada um clama por uma melhor qualidade de vida em termos materiais e alimentação, especialmente no meio rural e nas regiões desenvolvidas [1].

Considerando o modelo simples seguinte que descreve a necessidade de se comercializar ou não os recursos energéticos temos:

$$R = EN \quad (1.1)$$

Aqui R é a energia anual total requerida pela população por N pessoas. E é o recurso energético per capita usado em média de um ano, relacionado de perto ao abastecimento de alimentos e produtos fabricados[1]. O nível de vida relaciona-se de uma maneira complexa e mal definida para E. Consequentemente o produto nacional bruto per capita S (crude é a medida padrão do nível de vida) pode ser relacionado com E por:

$$S = fE \quad (1.2)$$

aqui f é um coeficiente complexo e não linear e que o mesmo serve de função para muitos factores. Pode ser considerada uma eficiência para transformação de energia em abundante. Obviamente perdas desnecessárias de energia tendem a um valor baixo de f que caso contrário seria possível. Substituindo por E em (1.1), temos:

$$R = SN / f \quad (1.3)$$

A população mundial actualmente esta acima de 4200 milhões e aumenta aproximadamente cerca de 2 a 3% por ano duplicando-se em cada 20 a 30 anos. Tragicamente a alta mortalidade infantil e baixa esperança de vida trata de ocultar a pressão intrínseca do crescimento populacional em muitos países.

Em termos do uso total de energia, E a nível mundial está abaixo de 0.8 kW, mas os valores que abrangem a extensão de certas regiões como os EUA é de 10 kW, Europa 4 kW, África Central 0,1 kW. O crescimento económico implica o aumento exponencial de S, cerca de 2 a 5 % por ano.

Para a constante de eficiência  $\eta$ , o crescimento mundial do fornecimento de energia devia ser de 4 a 8 % por ano. Sem novos recursos alternativos tal crescimento não poderá prevalecer [1].

Como ainda precisa-se de muita energia, combustíveis fósseis começam a esgotar-se. Seja qual for o estado da energia nuclear, todos os planos incluem dois factores vitais para melhoramento e manutenção dos benefícios sociais da energia que são:

- O aproveitamento da energia renovável;
- O aumento da eficiência no uso da energia.

Felizmente os recursos das energias renováveis encontram-se disponíveis em áreas remotas e menos privilegiadas, como também nas regiões desenvolvidas [1]. Considerando um cálculo elementar no fornecimento de 2 kW de potência por pessoa, na qual poderá ser satisfatória para um estilo de vida desenvolvido com a devida consideração da conservação de energia e eficiência [1].

Em cada quilómetro quadrado habitado da superfície da terra possui uma média de um fluxo de energia é cerca de 500 W. Isto inclui a energia solar, o vento ou outras formas de energias renováveis no total estimadas [1].

## **1.2 Principais Tecnologias de Energias Renováveis**

### **1.2.1 Energia Solar**

Energia da radiação solar directa, que pode ser aproveitada de diversas formas através de diversos tipos de conversão, permitindo seu uso em aplicações térmicas em geral, obtenção de força motriz diversa, obtenção de electricidade e de energia química [2]. As tecnologias principais de conversão de energia solar são duas:

- Conversão fotovoltaica;
- Conversão térmica.

Por conversão fotovoltaica de energia solar estende-se a transformação directa de radiação solar em electricidade por meio de dispositivos chamados células/módulos solares [2]. A conversão térmica de energia solar é a transformação da radiação em calor. As aplicações térmicas podem ser de carácter activo ou passivo. As aplicações activas referem-se a sistemas de aquecimento de água ou de cozinha, entre outros, e as aplicações passivas referem-se as técnicas de construção de edifícios de modo a optimizar o conforto que elas providenciam ao longo do ano [3].

### 1.2.2 Energia Eólica

É a energia cinética das massas de ar provocadas pelo aquecimento desigual na superfície do planeta [2]. Além da radiação solar também têm participação na sua formação fenómenos geofísicos como: rotação da terra, marés atmosféricas e outros [2]. Os cata-ventos e embarcações a vela são formas bastante antigas de seu aproveitamento [2]. Os aerogeradores modernos de tecnologia recente têm se firmado como uma forte alternativa na composição da matriz energética de diversos países [2]. Assim pode-se usar a energia eólica sob a forma mecânica directa ou sob a forma de electricidade [3]. Portanto as tecnologias de energia eólica são de dois tipos:

- Sistemas puramente mecânicos;
- Sistemas eléctricos.

No que se refere a dimensão dos sistemas eles classificam-se em:

- Sistemas de pequena escala, até 100 kW;
- Sistemas de média escala, de 100 kW a 700 kW;
- Sistemas de larga escala, acima de 700 kW.

A tecnologia de energia edíca é madura e bem estabelecida, simples e robusta, com tempos de vida que ultrapassam os 20 anos [3].

### **1.2.3 Energia Hídrica**

É a energia cinética das massas de água dos rios, que fluem de altitudes elevadas para os mares e oceanos graças a força gravitacional [2]. Este fluxo é alimentado em ciclo reverso graças a evaporação da água, elevação e transporte do vapor em formas de nuvens, naturalmente realizados pela radiação solar e pelos ventos [2].

A energia cinética que as águas transportam pode ser captada para a produção de energia útil, através de turbinas. As tecnologias de energia hídrica são essencialmente de dois tipos:

- Captação de água;
- Produção de energia eléctrica.

Os sistemas de aproveitamento de energia hídrica classificam-se em:

- Sistemas micro hídricos, até cerca de 100 kW;
- Sistemas mini hídricos, de 100 kW a 10 MW;
- Sistemas de larga escala, mais de 10 MW.

Os sistemas micro e mini hídrico são designados conjuntamente de sistemas hídricos de pequena escala [2]. De salientar que apenas esta categoria de sistemas faz parte do grupo de energias renováveis.

Esta tecnologia assemelha-se a da energia edíca e afigura-se madura e bem estabelecida, com tempos de vida que ultrapassam os 20 anos.



### **1.2.4 Energia do Biogás**

Um recurso energético com bastante valor que entretanto não tem sido explorado no país. É o caso dos excrementos animais e também humanos que podem ser usados ao nível do sector doméstico para a produção do biogás (em biodigestores e biolatrinas, respectivamente) que pode ser canalizado e usado como combustível moderno para suprir as necessidades de energia para a cozinha e para a alimentação [3].

A título de exemplo Municípios como Beira, Ilha de Moçambique e Pemba debatem-se com problemas graves de saneamento do meio devido as práticas “tradicionais” de fecalismo a “céu-aberto”, com surtos cíclicos de cólera que eliminam anualmente dezenas de vidas. As biolatrinas seriam um grande incentivo a implementação de medidas de saneamento por latrinas, com resultados concretos sobre a economia e o bem-estar [3].

## **1.3 Princípios Científicos das Energias Renováveis**

### **1.3.1 Características Dinâmicas**

A maior procura de electricidade na rede eléctrica muitas vezes se verifica durante a manhã e a tarde, e baixa durante a noite. Se a potência é de uma fonte não renovável tal como petróleo, o investimento poderá ser ajustado em resposta a procura. A energia que for utilizada não se gasta, mais permanece como fonte de combustível. Contudo, com os sistemas de energias renováveis, não somente a finalidade varia sem nenhum controle com o tempo mas também a substituição natural no ambiente [1].

### **1.3.2 Qualidade de Abastecimento**

A qualidade de distribuição e armazenamento é muitas vezes discutida, mas usualmente permanece indefinida. A qualidade é definida como a proporção de um recurso de energia, que pode ser convertido em trabalho mecânico. Os

sistemas de energias renováveis estão divididos qualitativamente nos seguintes ramos [1]:

- Processos mecânicos
- Processos térmicos
- Processo do fóton

### 1.3.4 Dispersão Versus Centralização da Energia

A diferença entre fontes de energia renovável e energia não renováveis está na densidade do fluxo da energia durante a transformação inicial. A energia renovável chega geralmente em aproximadamente  $1 \text{ kWm}^{-2}$  (feixe de irradiação solar, energia no vento em  $10 \text{ ms}^{-1}$ ), visto que as fontes centralizadas não renováveis têm uma densidade do fluxo de energia com valores mais grandes. Por exemplo, os tubos da caldeira em formilhas de gás transferem facilmente  $100 \text{ kWm}^{-2}$ , e num reactor nuclear a transferência de calor na primeira parede é de muitos  $\text{MWm}^{-2}$ . Em resumo energias não renováveis são facilmente centradas e a sua distribuição é cara. A energia renovável pode ser facilmente aproveitada de maneira dispersa e é cara concentrar [1].

### 1.4 Aplicações de Energias Renováveis

As energias renováveis em regra não representam uma alternativa em relação a rede eléctrica convencional no presente momento [3]. Elas têm um potencial de aplicação onde a rede convencional não chega e onde não se justifica a extensão da rede eléctrica devido a factores técnico-económicos [3]. Há entretanto excepções a esta regra, por exemplo, o aquecimento de água a energia solar que mesmo em zonas urbanas é mais viável que o aquecimento através da energia eléctrica [3]. As principais aplicações das energias renováveis podem ser classificadas da seguinte maneira:

- Sector doméstico;

- Sector comunitário;
- Sector institucional;
- Sector produtivo.

Actualmente o sector doméstico rural é denominado pela utilização de candeeiros a petróleo ou lenha para a iluminação e pilhas secas para alimentar aparelhos de rádio [3]. Para estas zonas a energia solar fotovoltaica pode desempenhar um papel muito importante. Esta tecnologia cobre de algum modo os pequenos consumidores, tais como carregamento de baterias, alimentação de lanternas, aparelhos de rádio, televisão, vídeo e música que os geradores convencionais não conseguem cobrir com viabilidade, apesar do seu custo por kWh ser ainda relativamente alto (Veja a tabela 1.1 abaixo). Assim a energia fotovoltaica é a tecnologia mais viável para pequenos consumos [3].

**Tabela 1.1 Custo Por kWh de Energia Produzida**

<b>Diesel</b> <b>[US\$]</b>	<b>Solar</b> <b>Fotovoltaica</b> <b>[US\$]</b>	<b>Eólica</b> <b>[US\$]</b>	<b>Hídrica</b> <b>[US\$]</b>
0,4 – 0,8	0,35 – 0,72	0,05 – 0,10	0,025 – 0,05

*Tabela1 Custo por kWh de energia produzida para diferentes tecnologias, das fontes [3].*

## CAPITULO 2

### 2 Introdução

O Sol é a fonte de energia que controla a circulação da atmosfera. O Sol emite energia em forma de radiação electromagnética, da qual uma parte é interceptada pelo sistema Terra-atmosfera e convertida em outras formas de energia como, por exemplo, calor e energia cinética da circulação atmosférica. É importante notar que a energia pode ser convertida, mas não criada ou destruída. É a lei da conservação da energia [5].

A energia solar não é distribuída igualmente sobre a Terra. Esta distribuição desigual é responsável pelas correntes oceânicas e pelos ventos que, transportando calor dos trópicos para os pólos, procuram atingir um balanço de energia. Estas causas residem nos movimentos da Terra em relação ao Sol e também em variações na superfície da Terra [5].

#### 2.1 Radiação Solar Electromagnética

Praticamente toda a troca de energia entre a Terra e o resto do Universo ocorre por radiação, que é a única que pode atravessar o relativo vazio do espaço. O sistema Terra atmosfera está constantemente absorvendo radiação solar e emitindo sua própria radiação para o espaço.

Numa média de longo prazo, as taxas de absorção e emissão são aproximadamente iguais, de modo que o sistema está muito próximo ao equilíbrio radioactivo. A radiação também tem papel importante na transferência de calor entre a superfície da Terra e a atmosfera e entre diferentes camadas da atmosfera.

A radiação electromagnética pode ser considerada como um conjunto de ondas (eléctricas e magnéticas) cuja velocidade no vácuo é ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ). As

várias formas de radiação, caracterizadas pelo seu comprimento de onda, compõem o espectro electromagnético (Figura 2.1).

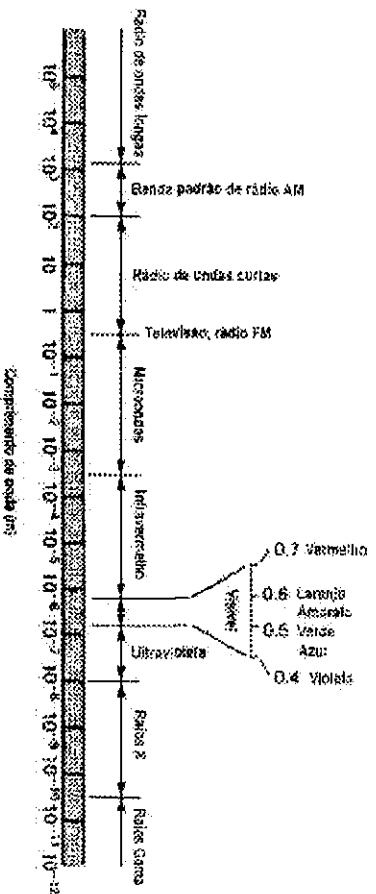


Figura 2.1 – Espectro electromagnético

Fonte [5]

Embora o espectro electromagnético seja contínuo, nomes diferentes são atribuídos a diferentes intervalos porque seus efeitos, geração, medida e uso são diferentes. Por exemplo, as células da retina do olho humano são sensíveis a uma radiação num estreito intervalo chamado luz visível, com  $\lambda$  entre  $0.7 \times 10^{-6}$  m e  $0.4 \times 10^{-6}$  m.

A maior parte da energia radiante do sol está concentrada nas partes visível e próximo do visível do espectro. A luz visível corresponde a 43% do total emitido, 49% estão no infravermelho próximo e 7% no ultravioleta. Menos de 1% da radiação solar é emitida como raios X, raios gama e ondas de rádio.

Apesar da divisão do espectro em intervalos, todas as formas de radiação são basicamente iguais. Quando qualquer forma de energia radiante é absorvida por um objecto, o resultado é um crescimento do movimento molecular e um correspondente crescimento da temperatura [5].

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) é a distância entre cristas (ou cavados) sucessivos (Figura 2.2); a frequência de onda ( $\nu$ ) é o número de ondas completas (1 ciclo) que passa por um dado ponto por unidade de tempo (s). A relação entre  $\lambda$ ,  $\nu$  e a velocidade  $c$  é:

$$c = \lambda \nu \quad (2.1)$$

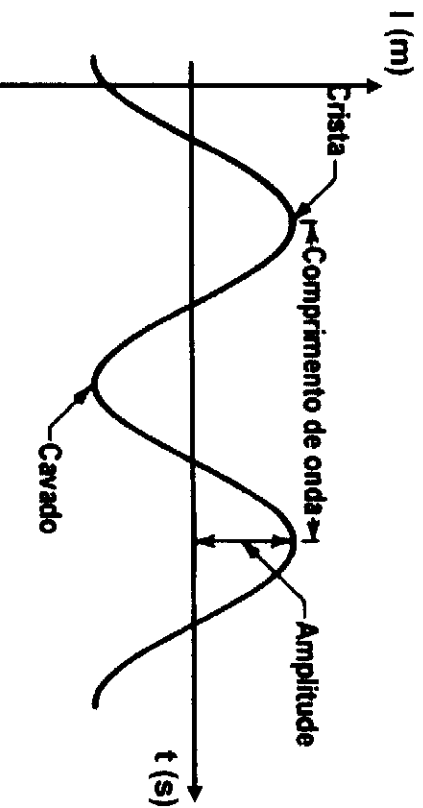


Fig. 2.2 - Características de uma onda

Fonte [5]

## 2.2 Absorção e Emissão de Radiação por Moléculas

Qualquer molécula isolada possui uma certa quantidade de energia além daquela associada com seu movimento no espaço. A maior parte está na forma de energia cinética e energia potencial electrostática dos electrões que se movimentam em órbitas em torno do núcleo dos átomos. Outras quantidades menores de energia estão associadas com a vibração de átomos em torno de suas posições médias na molécula e a rotação da molécula em torno de seu centro de massa [5].

A mecânica quântica prevê que apenas certas configurações de órbitas de electrões são permitidas para cada átomo e que apenas certas frequências e amplitudes vibracionais, e certas taxas de rotação são permitidas para uma molécula particular. Cada combinação possível de órbitas de electrões, vibração e rotação pode ser identificada com um nível particular de energia, que representa a soma dos três tipos de energia. Uma molécula pode sofrer uma transição para um nível mais alto de energia absorvendo radiação electromagnética. Da mesma forma, ela pode descer a um nível mais baixo de energia emitindo energia radiante. Somente certas variações discretas de energia são permitidas, previstas pela teoria quântica.

A teoria quântica também prevê que a energia transmitida por radiação electromagnética existe em unidades discretas chamadas fótons. A quantidade de energia associada com um fóton de radiação é dada por:

$$W = h\nu \quad , \quad (2.2)$$

Onde  $\nu$  é a frequência da radiação (em  $s^{-1}$  ou Hertz),  $h$  é a constante de Planck, que é igual a  $6,626 \times 10^{-34} Js$ . Portanto, a quantidade de energia contida num fóton de radiação é inversamente proporcional ao comprimento de onda da radiação (Ver a equação 2.1).

Como uma molécula isolada só pode absorver e emitir radiação em quantidades discretas, ela pode interagir apenas com certos comprimentos de onda. Assim, as propriedades de absorção e emissão de uma molécula podem ser descritas em termos de um espectro de linhas, que consiste de um número finito de linhas de absorção ou emissão muito finas, separadas por lacunas nas quais a absorção e emissão de radiação não é possível.

A maior parte das linhas de absorção associadas com mudanças orbitais envolvem radiação de raios X, ultravioleta e radiação visível. Mudanças vibracionais são usualmente associadas com o intervalo infravermelho, enquanto as transições rotacionais, que envolvem as menores quantidades de energia, tendem a estar associadas com a região de microondas. Algumas moléculas, como o  $CO_2$ ,  $H_2O$  e  $O_3$  podem absorver ou emitir um fóton de energia radiante quando sofrem uma transição simultânea rotação-vibração. Estas moléculas exibem aglomerados de linhas, com milhares de linhas próximas na região do infravermelho. Outras moléculas, como o  $O_2$  e  $N_2$  não podem interagir com a radiação desta forma e portanto, seus espectros não exibem muitas linhas na região do infravermelho.

Além dos processos acima descritos, há dois outros modos possíveis pelos quais um átomo ou uma molécula pode absorver ou emitir radiação electromagnética:

1) Uma molécula pode absorver radiação cuja energia seja suficiente para "quebrá-la" em seus componentes atômicos. Átomos instáveis podem também combinar-se para formar moléculas mais estáveis, liberando seu excesso de energia sob forma de radiação. Nestas reacções fotoquímicas a absorção ou emissão de radiação electromagnética tem papel crucial em fornecer ou remover energia. Um exemplo:



Ao contrário das transições discutidas anteriormente, as reacções fotoquímicas podem envolver um trecho contínuo de comprimentos de onda, desde que sejam suficientemente curtas para que um fóton de energia eleve a energia química da molécula a um limiar onde a foto dissociação pode ocorrer. Qualquer excesso de energia é transformado em energia cinética dos átomos, que serve para aumentar a temperatura do gás. A maior parte das reacções fotoquímicas na atmosfera envolvem radiação ultravioleta e visível.

2) Todos os átomos podem ser ionizados por radiação com comprimento de onda suficientemente curta. Este processo, chamado fotoionização, requer fótons com energia suficiente para arrancar um ou mais electrões mais externos de suas órbitas. Como as reacções fotoquímicas a fotoionização pode envolver radiação num intervalo contínuo de comprimentos de onda até o valor correspondente ao nível limite de energia. A radiação de ionização é usualmente associada com comprimentos de onda menores que  $\approx 0,1 \mu\text{m}$ , [5].

As linhas do espectro das moléculas de um gás apresentam-se alargadas pelos seguintes motivos [5]:

i) Alargamento natural – Os níveis de energia nominais de um átomo e os comprimentos de onda que ele pode absorver são apenas os mais prováveis, sendo que na realidade um pequeno intervalo de comprimentos de onda podem ser absorvidos ou emitidos: este intervalo é chamado "largura de onda".



ii) Alargamento devido ao efeito Doppler – Os movimentos aleatórios das moléculas dentro de um gás podem causar desvios do comprimento de onda emitido (ou absorvido) pelas moléculas que se aproximam ou afastam, resultando no alargamento de linha. Este alargamento depende da velocidade média quadrática das moléculas do gás, que é directamente proporcional à raiz quadrada da temperatura absoluta.

iii) Alargamento devido a colisões – As perturbações causadas nos níveis de energia de uma molécula, pela interacção com outras moléculas, átomos ou iões que passam próximo ou colidem, levam a molécula a absorver comprimentos de onda um pouco diferentes dos usuais. Este alargamento depende da frequência das colisões moleculares, que é directamente proporcional à pressão do gás. Em níveis abaixo dos 30 km, na atmosfera da Terra, a largura das linhas de absorção é bastante determinada pelo alargamento devido a colisões.

iv) Alargamento devido a campos magnéticos – Neste caso as linhas espectrais se desdobram devido ao alinhamento do momento magnético associado ao átomo ou paralelo ou anti paralelo à indução magnética externa. Este é o efeito Zeeman [5].

Dentro de líquidos e sólidos a interacção entre campos de moléculas individuais é tão forte que a absorção e emissão ocorre num espectro contínuo de comprimentos de onda, ao contrário do espectro de linhas.

## 2.3 Descrição Quantitativa da Radiação

Fluxo radiante = taxa de transferência de energia  $\left(\frac{\text{Joules}}{\text{segundo}} = \text{Watts}\right)$ . Para o sol:  $3,9 \times 10^{26} \text{ W}$ .

Irradiância (E): fluxo radiante por unidade de área  $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)$ .

A irradiância da radiação electromagnética que passa através dos limites do disco visível do sol (raio  $\approx 7 \times 10^8$  m) é dada por:

$$\frac{3,90 \times 10^{26}}{4\pi(7 \times 10^8)^2} = 6,34 \times 10^7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

A irradiância média da radiação solar que atinge a órbita da Terra, num plano perpendicular aos raios solares, no topo da atmosfera é  $1,38 \times 10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  (ou 1,97 cal/cm<sup>2</sup> min) que constitui a chamada constante solar. A diferença entre a irradiância no afélio e perihélio é de ~6,7% [5].

Irradiância monocromática ( $E_\lambda$ ): irradiância por unidade de intervalo de comprimento de onda, no comprimento de onda  $\lambda$  ( $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m}}$ ). Portanto, a irradiância pode ser dada por:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda \quad (2.3)$$

## 2.4 Leis de Radiação (Para Corpos Negros)

Um corpo negro é um corpo hipotético que emite (ou absorve) radiação electromagnética em todos os comprimentos de onda, de forma que:

- Toda a radiação incidente seja completamente absorvida; e
- Em todos os comprimentos de onda e em todas as direcções a máxima radiação possível para a temperatura do corpo seja emitida.

A radiação do corpo negro é isotrópica, isto é, não depende da direcção.

O Sol e a Terra irradiam aproximadamente como corpos negros. Portanto, as leis de radiação dos corpos negros podem ser aplicadas à radiação solar e terrestre com algumas restrições [5].

A irradiância monocromática emitida por um corpo negro é determinada por sua temperatura e pelo comprimento de onda considerado, conforme descrito pela Lei de Planck.

$$E_{\lambda}^* = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (2.4)$$

onde  $C_1 = 3,74 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$ ,  $C_2 = 1,44 \times 10^{-2} \text{ mK}$  e é a base dos logaritmos naturais ( $e=2,718$ ). Gráficos de  $E_{\lambda}^*$  em função de  $\lambda$  para algumas temperaturas são mostrados na Fig. 2.3.

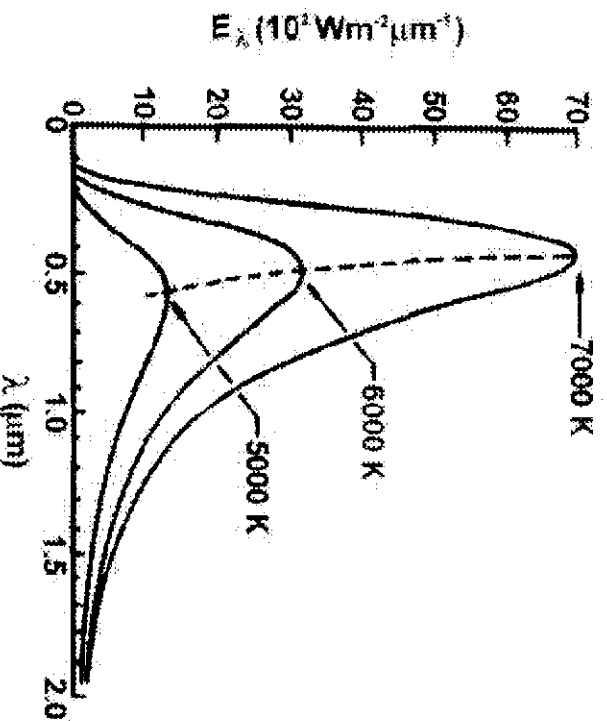


Figura 2.3 – Irradiância monocromática para corpo negro para várias temperaturas.

A equação (2.4) pode ser simplificada para:

$$E_{\lambda}^* \cong C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (2.5)$$

excepto para grandes comprimentos de onda.

Usando a aproximação da equação (2.5) é possível mostrar que o comprimento de onda do pico de emissão para um corpo negro com temperatura T é dado por:

$$\lambda_m = \frac{2897}{T} \quad (2.6)$$

onde  $\lambda_m$  é expresso em micro ( $10^{-6}$  m) e T em Kelvin.

A equação (2.6) é a lei de deslocamento de Wien. Com ela é possível estimar a temperatura de uma fonte a partir do conhecimento de seu espectro de emissão. Por exemplo, sabendo-se que a máxima emissão solar ocorre em  $\sim 0,475 \mu$ , deduz-se que sua temperatura equivalente de corpo negro é 6100 K. A Terra, com T  $\sim 288$  K, tem máxima emissão em  $\lambda_m \sim 10 \mu$ . [5].

Da lei de Wien decorre que a radiação solar é concentrada nas partes visível e infravermelho próximo, enquanto a radiação emitida pela Terra e sua atmosfera, é principalmente confinada ao infravermelho. Quanto mais quente o corpo radiante, menor é o comprimento de onda da máxima radiação.

A irradiância do corpo negro, obtida pela integração da equação (2.4) sobre os comprimentos de onda, é dada por:

$$E^* = \sigma T^4 \quad (2.7)$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor é  $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ . Esta equação é a lei de Stefan-Boltzmann.

Dela se conclui que corpos com maior temperatura emitem mais energia total por unidade de área que aqueles com menor temperatura. O Sol, portanto,

com  $T \sim 6000 \text{ K}$ , emite centenas de milhares de vezes mais energia que a Terra, com  $T \sim 288 \text{ K}$ .

Conforme já mencionado, a radiação do corpo negro representa o limite máximo de radiação que um corpo real pode emitir num dado comprimento de onda, para uma dada temperatura. Para corpos reais, define-se uma quantidade chamada emissividade:

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda}^*} \quad (2.8)$$

e emissividade de corpo cinza:

$$\epsilon = \frac{E}{E^*} = \frac{E}{\sigma T^4} \quad (2.9)$$

Para um corpo negro  $\epsilon_{\lambda}$  e  $\epsilon$  são iguais a 1 e para corpos reais estão entre 0 e 1.

Pode-se definir quantidades correspondentes chamadas absortividade  $a_{\lambda}$ :

$$a_{\lambda} = \frac{E_{\lambda} \text{ absorvido}}{E_{\lambda} \text{ incidente}} \quad (2.10)$$

E absortividade de corpo cinza:

$$a = \frac{E \text{ absorvido}}{E \text{ incidente}} \quad (2.11)$$

A Lei de Kirchhoff afirma que:

$$a_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} \text{ (e também } a = \epsilon) \quad (2.12)$$

ou seja, materiais que são fortes absorvedores num comprimento de onda particular são também fortes emissores neste comprimento de onda; analogamente absorvedores fracos são fracos emissores [5].

Um exemplo é a neve fresca que é fraco absorvedor no intervalo visível mas forte absorvedor no intervalo infravermelho.

Esta lei pode ser aplicada não só a corpos opacos, mas também a gases, desde que a frequência das colisões moleculares seja grande em relação à frequência dos eventos individuais de absorção e emissão. Na atmosfera da Terra esta condição é satisfeita até altitudes de ~ 60 km [5].

## 2.5 Distribuição da Radiação

A radiação monocromática incidente sobre qualquer superfície opaca (como a superfície da Terra) é ou absorvida ou reflectida [5]:

$$E_{\lambda}(\text{absorvido}) + E_{\lambda}(\text{reflectido}) = E_{\lambda}(\text{incidente}) \quad (2.13)$$

Dividindo cada termo nesta expressão pela irradiância monocromática incidente obtemos:

$$a_{\lambda} + r_{\lambda} = 1 \quad (2.14)$$

onde  $a_{\lambda}$  é a absortividade e  $r_{\lambda}$  é a reflectividade (ou albedo) da superfície. Em quaisquer comprimentos de onda, fortes reflectores são fracos absorvedores (por exemplo, a neve fresca no intervalo visível) e vice-versa (por exemplo, asfalto no intervalo visível). As reflectividades de algumas superfícies para o intervalo de comprimentos de onda da radiação solar (intervalo visível) estão na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 ALBELDO PARA ALGUMAS SUPERFÍCIES**

ALBELDO PARA ALGUMAS SUPERFÍCIES NO INTERVALO VISÍVEL	[%]
Solo descoberto	10 – 25
Areia, deserto	25 – 40
Gramma	15 – 25
Floresta	10 – 20
Neves (limpa, seca)	75 – 95
Neves (molhada e/ ou suja)	25 – 75
Superfície do mar (sol > 25 graus acima do horizonte)	<10
Superfície do mar (pequena altura do sol)	10 – 70
Nuvens espessas	70 – 80
Nuvens finas	25 – 50

*Fonte [5]*

A irradiância monocromática incidente sobre uma camada não opaca (como a atmosfera) pode ser espalhada, reflectida, absorvida ou transmitida. Analogamente à equação (2.14), pode-se escrever:

$$a_{\lambda} + r_{\lambda} + s_{\lambda} + T_{\lambda} = 1 \quad (2.15)$$

Onde  $S_{\lambda}$  se refere à fracção da irradiância incidente que é espalhada e  $T_{\lambda}$  à fracção que é transmitida no comprimento de onda dado (transmissividade da camada).

## 2.6 Radiação Solar Incidente

Embora a atmosfera seja muito transparente à radiação solar incidente, somente em torno de 25% penetra directamente na superfície da Terra sem nenhuma interferência da atmosfera, constituindo a insolação directa. O restante é ou reflectido de volta para o espaço ou absorvido ou espalhado em volta até atingir a superfície da Terra ou retornar ao espaço (Figura 2.4) [5].

O que determina se a radiação será absorvida, espalhada ou reflectida de volta? Como veremos, isto depende em grande parte do comprimento de onda da energia que está sendo transportada, assim como do tamanho e natureza do material que intervém [5].

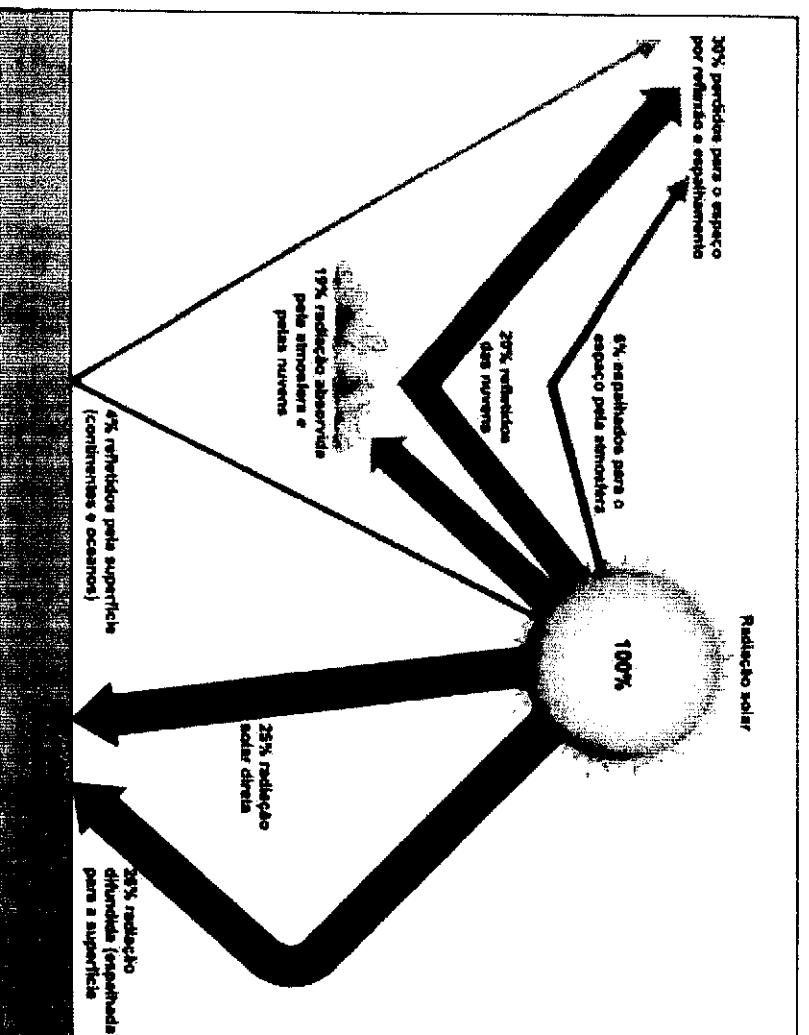


Figura 2.4 – Distribuição percentual da radiação solar incidente

Fonte [5]



### a) Espalhamento

Embora a radiação solar incida em linha recta, os gases e aerossóis podem causar seu espalhamento, dispersando-a em todas as direcções – para cima, para baixo e para os lados. A reflexão (veja mais adiante) é um caso particular de espalhamento [5]. A insolação difusa é constituída de radiação solar que é espalhada ou reflectida de volta para a Terra. Esta insolação difusa é responsável pela claridade do céu durante o dia e pela iluminação de áreas que não recebem iluminação directa do sol.

As características do espalhamento dependem, em grande parte, do tamanho das moléculas de gás ou aerossóis [5]. O espalhamento por partículas cujo raio é bem menor que o comprimento de onda da radiação espalhada, como o caso do espalhamento da luz visível por moléculas de gás da atmosfera, é dependente do comprimento de onda (espalhamento Rayleigh), de forma que a irradiância monocromática espalhada é inversamente proporcional à 4ª potência do comprimento de onda ( $E_{\lambda s} \sim 1/\lambda^4$ ). Esta dependência é a base para explicar o azul do céu [5].

Conforme mencionado anteriormente, grande parte da energia da radiação solar está contida no intervalo visível, entre o vermelho e o violeta. A luz azul ( $\lambda \cong 0,425\mu$ ) tem comprimento de onda menor que a luz vermelha ( $\lambda \cong 0,625\mu$ ).

Consequentemente, a luz azul é aproximadamente 5,5 vezes mais espalhada que a luz vermelha [5]. Além disso ela é mais espalhada que o verde, amarelo e laranja. Assim, o céu, longe do disco do sol, parece azul [5].

Como a luz violeta ( $\lambda \cong 0,405\mu$ ) tem um comprimento de onda menor que a azul, por que o céu não parece violeta? Porque a energia da radiação solar contida no violeta é muito menor que a contida no azul e porque o olho humano é mais sensível à luz azul que à luz violeta.

Como a densidade molecular decresce drasticamente com a altura, o céu, visto de alturas cada vez maiores, iria gradualmente escurecer até tornar-se

totalmente escuro, longe do disco solar. Por outro lado, o Sol apareceria cada vez mais branco e brilhante [5].

Quando o Sol se aproxima do horizonte (no nascer e por do Sol) a radiação solar percorre um caminho mais longo através das moléculas de ar, e portanto mais e mais luz azul e com menor comprimento de onda é espalhada para fora do feixe de luz, e portanto a radiação solar contém mais luz do extremo vermelho do espectro visível. Isto explica a coloração avermelhada do céu ao nascer e por do Sol. Este fenómeno é especialmente visível em dias nos quais pequenas partículas de poeira ou fumaça estiverem presentes [5].

Quando a radiação é espalhada por partículas cujos raios se aproximam ou excedem em aproximadamente até 8 vezes o comprimento de onda da radiação, o espalhamento não depende do comprimento de onda (espalhamento Mie). A radiação é espalhada igualmente em todos os comprimentos de onda.

Partículas que compõem as nuvens (pequenos cristais de gelo ou gotículas de água) e a maior parte dos aerossóis atmosféricos espalham a luz do Sol desta maneira. Por isso, as nuvens parecem brancas e quando a atmosfera contém grande concentração de aerossóis o céu inteiro aparece esbranquiçado [5].

Quando o raio das partículas é maior que aproximadamente 8 vezes o comprimento de onda da radiação, a distribuição angular da radiação espalhada pode ser descrita pelos princípios da óptica geométrica [5]. O espalhamento de luz visível por gotas de nuvens, gotas de chuva e partículas de gelo pertence a este regime e produz uma variedade de fenómenos ópticos como arco-íris, auréolas, etc.

## **b) Reflexão**

Aproximadamente 30% da energia solar é reflectida de volta para o espaço (Figura 2.4). Neste número está incluída a quantidade que é retro espalhada. A reflexão ocorre na interface entre dois meios diferentes, quando parte da radiação que atinge esta interface é enviada de volta [5]. Nesta interface o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão (lei da reflexão).

A fracção da radiação incidente que é reflectida por uma superfície é o seu albedo. Portanto, o albedo da Terra como um todo (albedo planetário) é 30% [5]. O albedo varia no espaço e no tempo, dependendo da natureza da superfície (Ver Tabela 2.1) e da altura do Sol. Dentro da atmosfera, os topos das nuvens são os mais importantes reflectores. O albedo dos topos de nuvens depende de sua espessura, variando de menos de 40% para nuvens finas (menos de 50m) a 80% para nuvens espessas (mais de 5000m) [5].

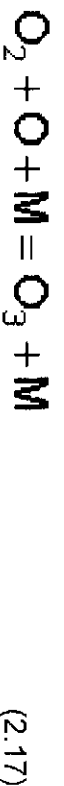
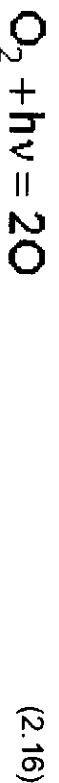
## **c) Absorção na Atmosfera**

O espalhamento e a reflexão simplesmente mudam a direcção da radiação. Contudo, através da absorção, a radiação é convertida em calor [5]. Quando uma molécula de gás absorve radiação esta energia é transformada em movimento molecular interno, detectável como aumento de temperatura. Portanto, são os gases que são bons absorvedores da radiação disponível que tem papel preponderante no aquecimento da atmosfera [5].

A Figura 2.4 fornece a absortividade dos principais gases atmosféricos em vários comprimentos de onda. O Nitrogénio, o mais abundante constituinte da atmosfera é um fraco absorvedor da radiação solar incidente, que se concentra principalmente nos comprimentos de onda entre  $0,2\mu$  e  $2\mu$ .

A foto dissociação do oxigénio (entre 50 a 110 km de altitude) absorve virtualmente toda radiação solar ultravioleta para  $0,1\mu < \lambda < 0,2\mu$ . O oxigénio atómico assim obtido é altamente reactivo, sendo de particular importância a reacção que é o mecanismo dominante para a produção de ozónio na

atmosfera (M é uma 3ª molécula necessária para retirar o excesso de energia liberada na reacção). Como a probabilidade de ocorrência desta reacção cresce com o quadrado da densidade do gás, o oxigénio atómico é estável na alta mesosfera e termosfera, enquanto na estratosfera ele se combina rapidamente para formar o ozónio. A radiação ultravioleta para  $0,2\mu < \lambda < 0,3\mu$  é absorvida na reacção de foto dissociação do ozónio (na estratosfera, entre 20 a 60 km)

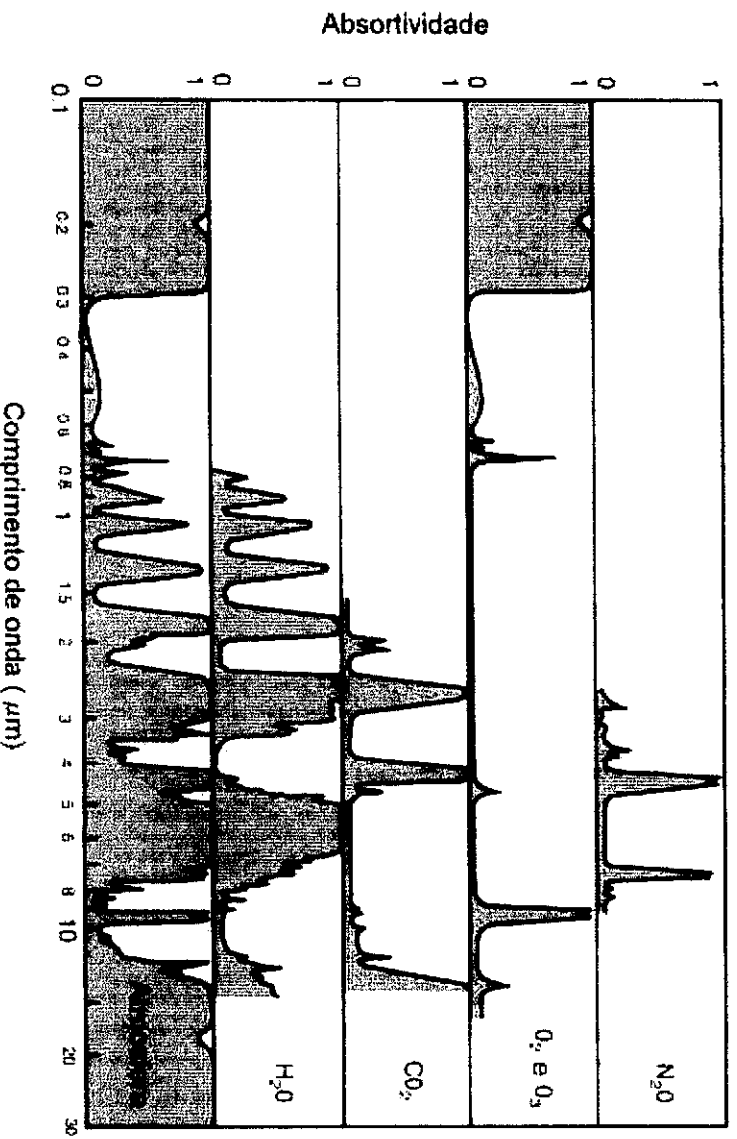


O átomo de oxigénio combina rapidamente com  $\text{O}_2$  para formar outra molécula de  $\text{O}_3$ , pela equação (2.16). Quando as equações (2.17) e (2.18) ocorrem sequencialmente não há mudança na estrutura química, mas somente absorção de radiação e resultante entrada de calor e aumento de temperatura na estratosfera [5].

O único outro absorvedor significativo da radiação solar incidente é o vapor de água que, com o oxigénio e o ozónio, respondem pela maior parte dos 19% da radiação solar que são absorvidos na atmosfera.

Da Figura 2.4 vemos que na atmosfera como um todo, nenhum gás absorve efectivamente radiação entre  $0,3\mu$  e  $0,7\mu$ ; portanto, existe uma larga "janela". Esta região do espectro corresponde ao intervalo visível ao qual pertence uma grande fracção da radiação solar. Pode-se dizer que a atmosfera é bastante transparente à radiação solar incidente pois absorve apenas 19% de sua energia e que, portanto, esta não é um aquecedor eficiente da atmosfera.

A maior parte da absorção da radiação solar em comprimentos de onda do intervalo infravermelho deve-se ao vapor de água e ocorre na troposfera, onde a maior parte do vapor de água está localizado. Esta parte da absorção apresenta grande variabilidade devido à distribuição do vapor de água.



*Figura 2.5 – Absortividade de alguns gases da atmosfera e da atmosfera como um todo.*

*Fonte [5]*

A Figura 2.6 mostra o espectro da radiação solar que atinge a superfície da Terra para o caso do Sol no zênite (altura = 90°) (curva inferior, juntamente com o espectro da radiação solar incidente no topo da atmosfera (curva superior). A área entre as duas curvas representa a diminuição da radiação devido a: 1) retro espalhamento e absorção por nuvens e aerossóis e 2) absorção por moléculas do ar (área não sombreada) e 2) absorção por moléculas do ar (área sombreada).

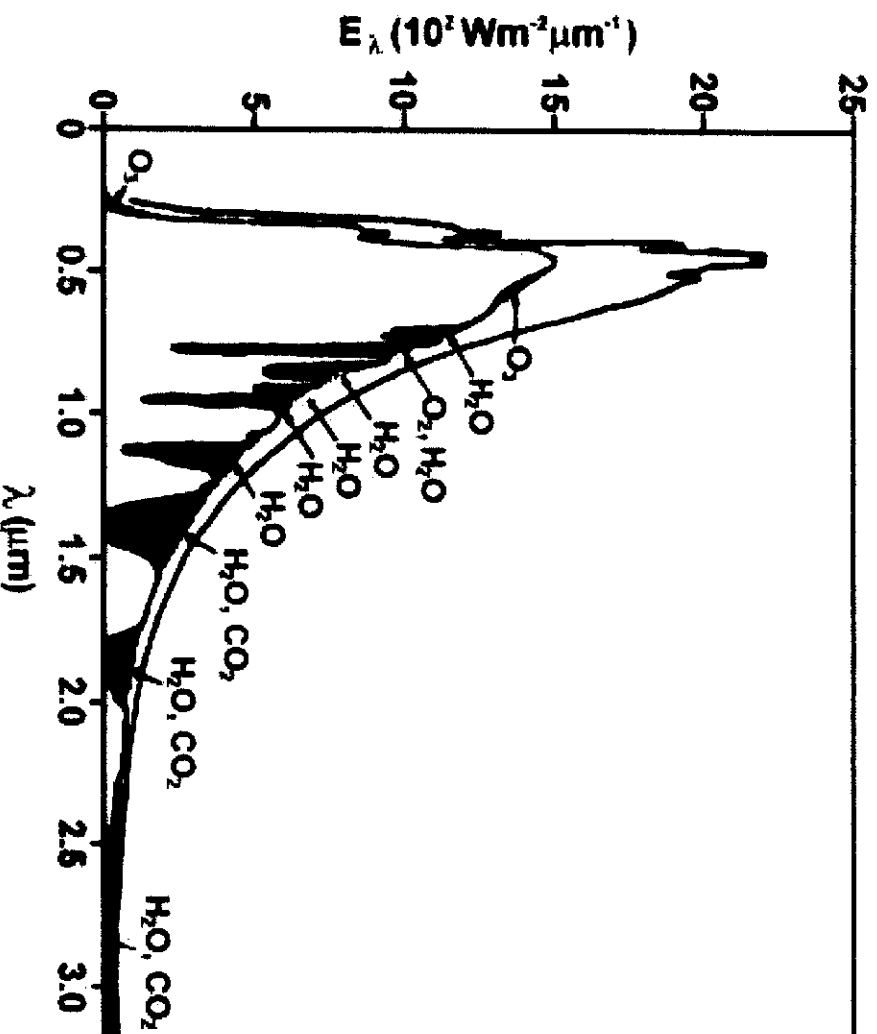


Figura 2.6 – Espectro da radiação solar no topo da atmosfera (curva superior) e no nível do mar (curva inferior), para atmosfera média e sol no zênite.

Fonte [5]

## 2.7 Radiação Terrestre

Aproximadamente 51% da energia solar que chega ao topo da atmosfera atinge a superfície da Terra. A maior parte desta energia é reirradiada para a atmosfera. Como a Terra tem uma temperatura superficial bem menor que a do Sol, a radiação terrestre tem comprimentos de onda maiores que a radiação solar, situados no intervalo infravermelho, entre  $1\mu\text{m}$  e  $30\mu\text{m}$ . Da Figura 2.5 conclui-se que a atmosfera é um absorvedor eficiente de radiação entre  $1\mu\text{m}$  e  $30\mu\text{m}$ . O vapor de água e o dióxido de carbono são os principais gases absorvedores neste intervalo.

O vapor de água absorve aproximadamente 5 vezes mais radiação terrestre que todos os outros gases combinados e responde pelas temperaturas mais altas na baixa troposfera, onde está mais concentrado. Como a atmosfera é bastante transparente à radiação solar (ondas curtas) e mais absorvente para radiação terrestre (ondas longas), a Terra é a maior fonte de calor para a atmosfera. A atmosfera, portanto, é aquecida a partir da superfície, o que é evidente no perfil vertical médio de temperatura na troposfera, que mostra um decréscimo ( $\sim 6,5^\circ \text{C/km}$ ) de temperatura com a altitude.

Quando a atmosfera absorve radiação terrestre ela se aquece e eventualmente irradia esta energia, para cima e para baixo, onde é novamente absorvida pela Terra. Portanto, a superfície da Terra é continuamente suprida com radiação da atmosfera e do Sol. Esta energia será novamente emitida pela superfície da Terra e uma parte retornará à atmosfera que, por sua vez, reirradiará uma parte para a Terra e assim por diante. Este jogo entre a superfície da Terra e a atmosfera torna a temperatura média da Terra  $\sim 35^\circ \text{C}$  mais alta do que seria. Sem os gases absorvedores da nossa atmosfera, a Terra não seria adequada para a vida humana e muitas outras formas de vida.

Este fenómeno extremamente importante tem sido denominado efeito estufa, porque pensava-se que as estufas fossem aquecidas da mesma forma. O vidro em uma estufa permite a entrada de radiação de onda curta, que é absorvida pelos objectos no interior. Estes objectos reirradiam, mas em ondas longas, para as quais o vidro é quase opaco. O calor, portanto, é retido na estufa. A retenção da radiação infravermelha pelo vidro, contudo, é apenas parte da razão pela qual uma estufa retém calor interno. Já foi demonstrado que as estufas atingem altas temperaturas porque o vidro protege do vento, restringindo as perdas de calor por convecção e advecção

[5]

A importância do vapor de água e dióxido de carbono em manter a atmosfera aquecida é bem conhecida em regiões montanhosas. Topos de montanhas recebem mais radiação que os vales durante o dia, porque há menos

atmosfera a atravessar. À noite, porém, a atmosfera menos densa também permite maior perda de calor. Este factor mais que compensa a radiação extra recebida e, como resultado, os vales permanecem mais quentes que as montanhas adjacentes, mesmo recebendo menos radiação [5].

As nuvens, assim como o vapor de água e o  $\text{CO}_2$ , são bons absorvedores de radiação infravermelha (terrestre) e tem papel importante em manter a superfície da Terra aquecida, especialmente à noite. Uma grossa camada de nuvens pode absorver a maior parte da radiação terrestre e reirradiá-la de volta. Isto explica porque em noites secas e claras a superfície se resfria bem mais que em noites húmidas ou com nuvens. Mesmo uma cobertura fina, através da qual a lua é visível, pode elevar a temperatura nocturna em torno de  $5^\circ\text{C}$  [5].

## 2.8 Medidas de Radiação

O piranómetro é o instrumento padrão para medida de intensidade da radiação solar que atinge uma superfície horizontal. O instrumento consiste de um sensor encerrado num hemisfério transparente que transmite a insolação total (directa mais difusa) em onda curta ( $< 3,5\mu\text{m}$ ) [5].

O sensor é um disco que consiste de sectores alternados brancos e pretos. Os sectores pretos são altamente absorvedores e os sectores brancos altamente reflectivos da radiação solar[5]. Diferenças na absorvidade e albedo significam que as temperaturas dos sectores brancos e pretos do sensor respondem de forma diferente a mesma intensidade de radiação solar. O contraste de temperatura entre os segmentos branco e preto é calibrado em termos de irradiância. Um piranómetro pode ser ligado electronicamente a um traçador de gráfico que regista continuamente a insolação, ou a saída pode ser gravada sobre uma fita magnética [5].



## CAPÍTULO 3

### 3. Introdução

A conversão de energia solar em energia eléctrica foi verificado pela primeira vez por Edmond Becquerel, em 1839 onde constatou uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor quando exposto a luz [1]. Em 1876 foi montado o primeiro aparato fotovoltaico resultado de estudos das estruturas no estado sólido, e apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial seguindo o desenvolvimento da microelectrónica [1]. Neste ano a utilização de fotocélulas foi de papel decisivo para os programas espaciais [1]. Com este impulso, houve um avanço significativo na tecnologia fotovoltaica onde aprimorou-se o processo de fabricação, a eficiência das células e seu peso [1].

Com a crise mundial de energia de 1973/74, a preocupação em estudar novas formas de produção de energia fez com que a utilização de células fotovoltaicas não se restringisse somente para programas espaciais mas que fosse intensamente estudadas e usadas no meio terrestre para suprir o fornecimento de energia [1].

Um dos factores que impossibilitava a utilização da energia solar fotovoltaica em larga escala era o alto custo das células fotovoltaicas. As primeiras células foram produzidas com o custo de US\$600/W para o programa espacial [1].

Com a ampliação dos mercados e várias empresas voltadas para a produção de células fotovoltaicas, o preço tem reduzido ao longo dos anos podendo ser encontrado hoje, para grandes escalas, o custo médio de US\$ 8,00/W [1].

As facilidades destes sistemas fotovoltaicos tais como: modularidade, baixos custos de manutenção e vida útil longa, fazem com que sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos da rede eléctrica [1].

### 3.1 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de electrão (banda de valência) e de outra onde totalmente "vazia" (banda de condução). A figura 3.1 ilustra parte desses fenómenos que ocorrem numa célula fotovoltaica [1].

O semicondutor mais usado é o silício. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro electrões que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina [1]. Ao adicionarem-se átomos com cinco electrões de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um electrão em excesso que não poderá ser emparelhado e que fica a "sobrar", ligado de uma forma fraca ao seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este electrão se livre, indo para a banda de condução [1]. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de electrões e denomina-se *dopante n* ou *impureza n* [1].

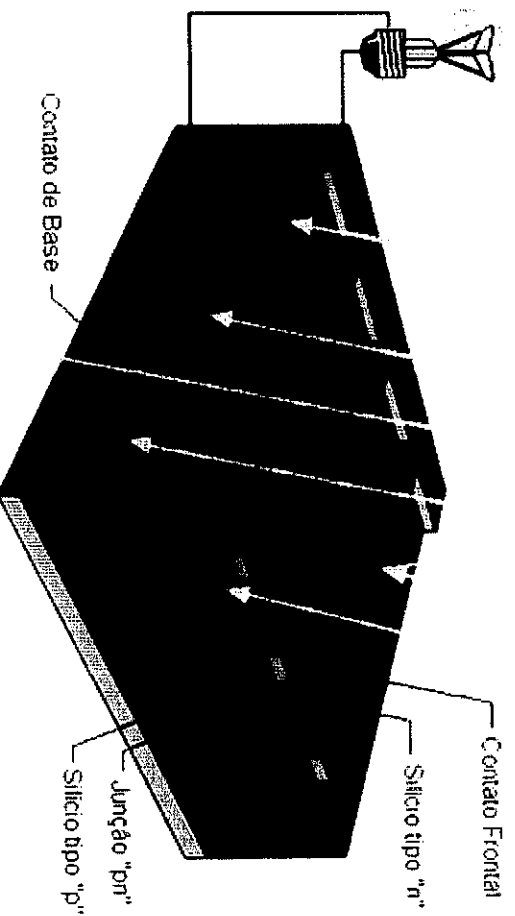


Figura 3.1 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica

Fonte [1]

Se, por outro lado, introduzem-se átomos com apenas três electrões de ligação, como é o caso do boro, haverá uma falta de um electrão para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede [1].

Esta falta de electrão é denominada *buraco* ou *lacuna* e ocorre que, com pouca energia térmica, um electrão de um sítio vizinho pode passar a esta posição, fazendo com que o buraco se desloque [1]. Diz-se portanto, que o boro é um *aceitador de electrões* ou um *dopante p*.

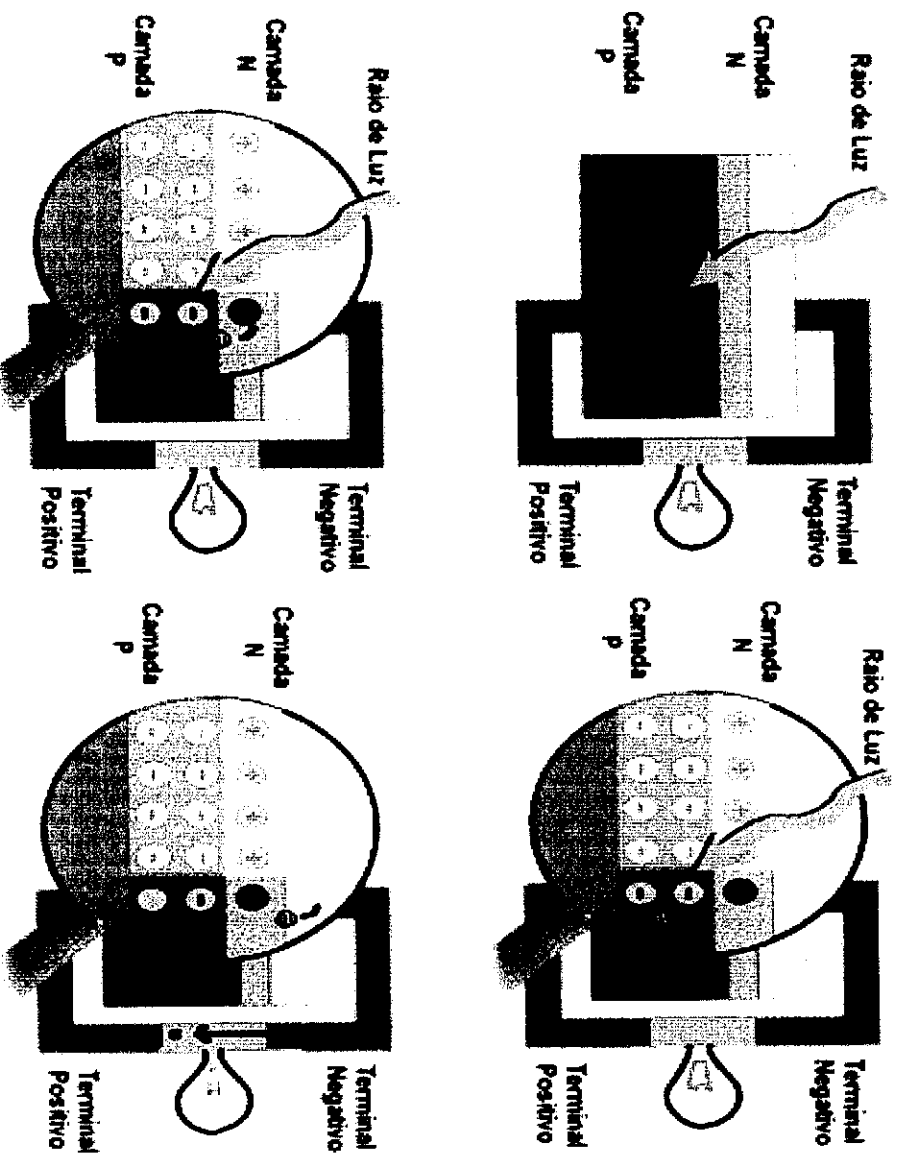


Figura 3.2 - Efeito fotovoltaico na junção pn  
Fonte[1]

Se, partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, será formado o que se chama *junção pn* [1]. O

que ocorre nesta junção é que electrões livres do lado n passam ao lado p onde encontram os buracos que os capturam; isto faz com que haja um acúmulo de electrões no lado p, tornando-o negativamente carregado e uma redução de electrões do lado n, que o torna electricamente positivo [1].

Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo eléctrico permanente que dificulta a passagem de mais electrões do lado n para o lado p; este processo alcança um equilíbrio quando o campo eléctrico forma uma barreira capaz de barrar os electrões livres remanescentes no lado n [1].

Se uma junção pn for exposta a um feixe de luz com energia maior que o *intervalo*, ocorrerá a geração de pares electrão-lacuna; se isto acontecer na região onde o campo eléctrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção; este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual chamamos de *Efeito Fotovoltaico* [1].

Se as duas extremidades do "pedaço" de silício forem ligadas por um fio, haverá uma circulação de electrões [1]. A figura 3.2 mostra a base do funcionamento das células fotovoltaicas [1].

### 3.2 Tipos de Células

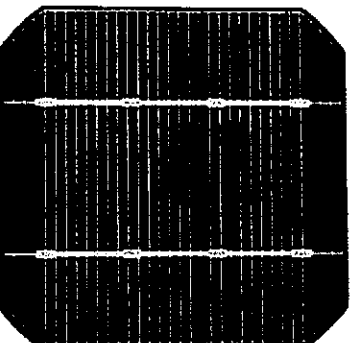
As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) e podendo ser constituída de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo [1].

#### 3.2.1 Silício Monocristalino

A figura 3.3 mostra a célula de silício monocristalino, que é historicamente a mais usada e comercializada como conversor directo de energia solar em electricidade e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído [1].

A fabricação da célula de silício começa com a extracção do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo atinge um grau de pureza em 98 e 99% o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e custo [1].

Este silício para funcionar como células foto voltaicas necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar na faixa de 99,9999% [1].



*Figura 3.3 - Célula de silício monocristalino*  
*Fonte [1]*

Para se utilizar o silício na indústria electrónica além do alto grau de pureza, o material deve ter a estrutura monocristalina e baixa densidade de defeitos na rede [1]. O silício é fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante, normalmente o boro que é do tipo p [1]. Com um fragmento do cristal devidamente orientado e sob rígido controle de temperatura, vai-se extraindo do material fundido um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Este cilindro obtido é cortado em fatias finas de aproximadamente 3000 m [1].

Após o corte e limpezas de impurezas das fatias, deve-se introduzir impurezas do tipo N de forma a obter a junção [1]. Este processo é feito através da difusão controlada onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800 a 1000°C [1].

Dentre as células fotovoltaicas que utilizam o silício como material base, as monocristalinas são, em geral, as que apresentam maior eficiência [1]. As

### 3.2.3 Silício Amorfo

Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos [1]. A utilização de silício amorfo para uso em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades eléctricas quanto no processo de fabricação [1]. Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo [1]. Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens [1]: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afectadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil [1].

Por outro lado, o silício amorfo apresenta vantagens que compensam as deficiências acima citadas, são elas [1]:

- Processo de fabricação relativamente simples e barato;
- Possibilidade de fabricação de células com grandes áreas;
- Baixo consumo de energia na produção.

### 3.3 Módulos Fotovoltaicos

Pela baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo. O arranjo das células nos módulos podem ser feito ligando-as em série ou em paralelo [1].

A figura 3.5 mostra células ligadas em paralelo, soma-se as correntes de cada módulo e a tensão do módulo é exactamente a tensão da célula. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua [1]. Pelas características típicas das células (corrente máxima por volta de 3A e tensão

muito baixa, em torno de 0,7V) este arranjo não é utilizado salvo em condições muito especiais [1].

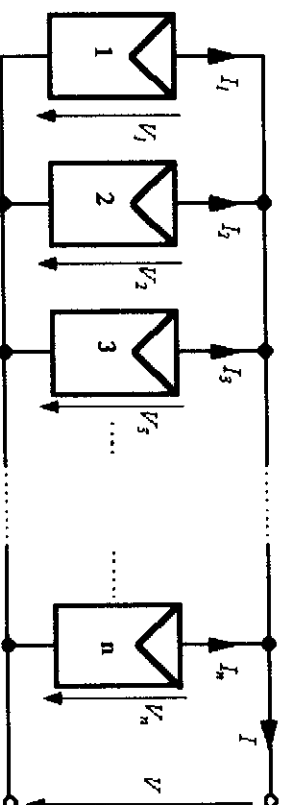


Figura 3.5 – Ligação de células em paralelo  
Fonte[1]

A ligação mais comum de células fotovoltaicas em módulos é o arranjo em série mostrado na figura 3.6. Este consiste em agrupar o maior número de células em série onde soma-se a tensão de cada célula chegando a um valor final de 12V o que possibilita a carga de acumuladores (baterias) que também funcionam na faixa dos 12V [1].

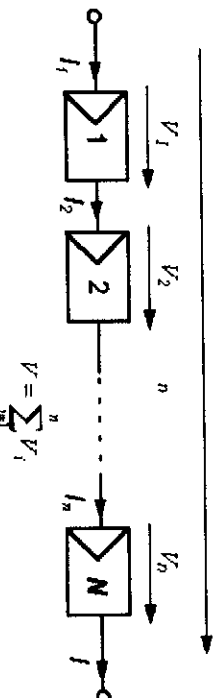
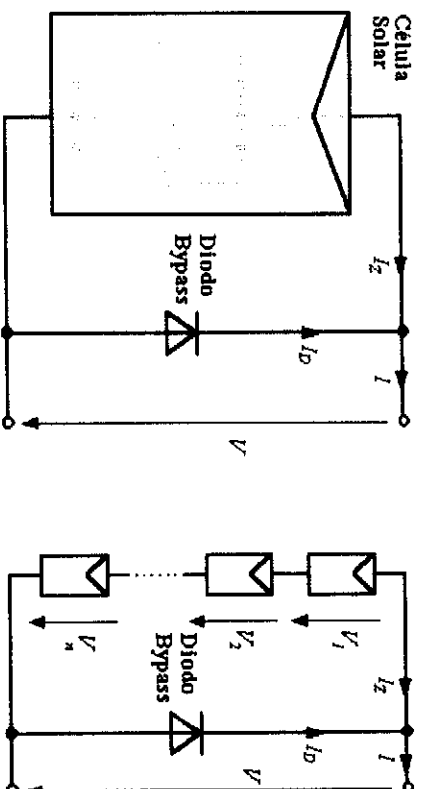


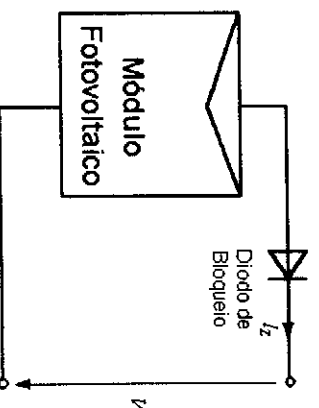
Figura 3.6 – Arranjo das células em série  
Fonte[1]

Quando uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo, estiver encoberta a potência de saída do módulo cairá drasticamente por estar ligada em série e comprometerá todo o funcionamento das demais células no módulo [1]. Para que todo a corrente de um módulo não seja limitado por uma célula de pior desempenho (o caso de estar encoberta), usa-se um diodo de passo ou de "bypass" [1]. Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa. Geralmente o uso do diodo bypass é feito em agrupamentos de células o que, torna muito mais barato comparado ao custo de se ligar um diodo em cada célula [1]. (Veja a figura 3.7).



*Figura 3.7 – Possível ligação para um diodo bypass entre células*  
*Fonte[1]*

Um outro problema que pode acontecer é quando surge um corrente negativa fluindo pelas células ou seja, ao invés de gerar corrente, o módulo passa a receber muito mais do que produz [1]. Esta corrente pode causar queda na eficiência das células e, em caso mais drástico, a célula pode ser desligada do arranjo causando assim a perda total do fluxo de energia do módulo. Para evitar esses problemas, utiliza-se um diodo de bloqueio impedindo assim correntes reversas que podem ocorrer caso liguem o módulo directamente em um acumulador ou bateria [1]. A figura 3.8 mostra a ligação do diodo de bloqueio.



*Figura 3.8 – Diodo de bloqueio*  
*Fonte[1]*



### 3.3.1 Características eléctricas dos módulos fotovoltaicos

Geralmente, a potência dos módulos é dada pela potência de pico. Tão necessário quanto este parâmetro, existem outras características eléctricas que melhor caracteriza a funcionalidade do módulo [1]. As principais características eléctricas dos módulos fotovoltaicos são as seguintes [1]:

- Voltagem de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ )
- Corrente de Curto-circuito ( $I_{sc}$ )
- Potência Máxima ( $P_m$ )
- Voltagem de Potência Máxima ( $V_{mp}$ )
- Corrente de Potência Máxima ( $I_{mp}$ )

## 3.4 Descrição Elétrica

### 3.4.1 Gerador Fotovoltaico Ideal

A maneira mais simples de se descrever um gerador fotovoltaico é representá-lo como uma fonte de corrente ideal, que gera uma corrente  $I_f$  aproximadamente proporcional à potência de radiação incidente, em paralelo com um diodo, como mostrado na Figura 3.9 [2].

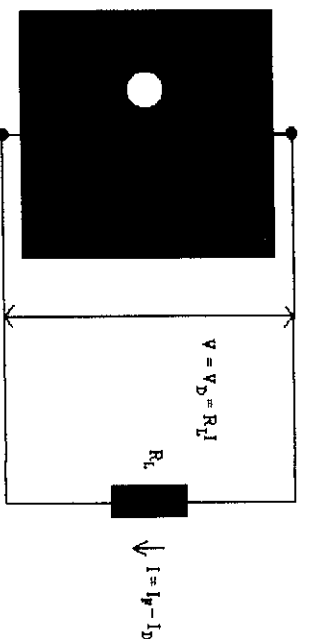


Figura 3.9 Gerador fotovoltaico ideal descarregando através de resistência finita. Fonte[2]

Em tais condições, uma parte da corrente produzida pela radiação solar passa pelo resistor externo  $R_L$  (corrente externa  $I$ ) e outra parte volta pelo diodo ( $I_D$ ).

Dessa forma, corrente externa é dada por:

$$I = I_F - I_D \quad (3.1)$$

Vê-se ainda, que no gerador fotovoltaico ideal a diferença de potencial  $V$  sobre o resistor é igual à diferença de potencial  $V_D$  sobre o diodo:

$$V = V_D \quad (3.2)$$

O diodo é um elemento não linear cuja curva tensão-corrente é dada numa forma geral por:

$$I_D = I_S \left( \exp \left( \frac{V_D}{V_T} \right) - 1 \right) \quad (3.3)$$

onde  $I_S$  e  $V_T$  são características do gerador, com  $V_T$  dependente da temperatura.

Substituindo a equação (3.2) na equação (3.3), e o resultado na equação (3.1), obtemos a função que descreve a curva característica  $I \times V$  de um gerador fotovoltaico ideal (Figura 3.9):

$$I = I_F - I_S \left( \exp \left( \frac{V}{V_T} \right) - 1 \right) \quad (3.4)$$

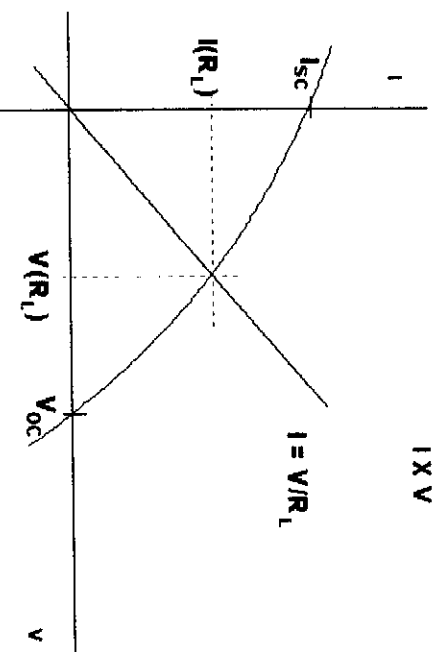


Figura 3.10 Curva característica  $I \times V$  de um gerador fotovoltaico ideal

Fonte [2]

O fato de fazermos um gráfico  $I \times V$  pode dar a falsa impressão de que a tensão (ou a corrente) é uma variável que pode ser variada independentemente; na verdade, na situação mostrada, a variável independente - mantida constante a intensidade luminosa - é a resistência externa  $R_L$ . Na verdade, na equação (3.4), a corrente  $I$  e a tensão  $V$  externas estão relacionadas por:

$$V = R_L I \quad (3.5)$$

o que permite eliminar uma das variáveis da equação (3.4) e escrever a outra como função de  $R_L$ . Essa é uma função transcendente, determinada conforme mostrado no gráfico da figura 3.10. Para cada valor da resistência corresponde um par  $I$  e  $V$  sobre a curva característica, que são as coordenadas do ponto no qual a curva é interceptada pela reta  $I = V / R_L$ .

Os valores da corrente de curto circuito  $I_{sc}$  e da tensão em circuito aberto  $V_{oc}$ , que correspondem aos pontos onde a curva característica cruza os eixos  $V = 0$  e  $I = 0$ , respectivamente, são calculados abaixo para um gerador fotovoltaico ideal:

## a) Gerador fotovoltaico ideal em circuito aberto

$$V_{oc} = V_T \ln \left( \frac{I_F + I_S}{I_S} \right) \quad (3.6)$$

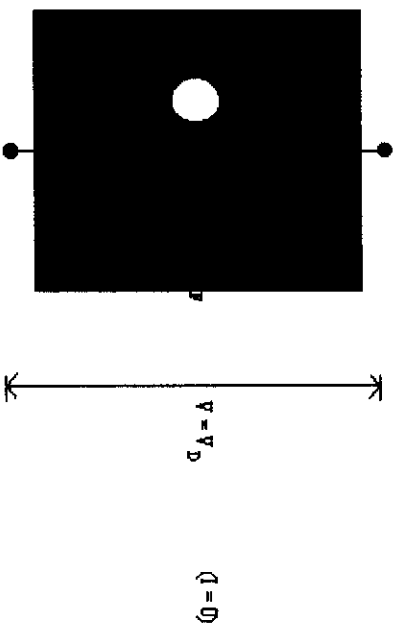


Figura 3.10a Gerador fotovoltaico ideal em circuito aberto

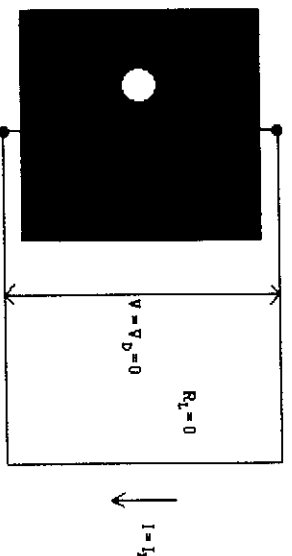
Fonte [2]

Quando o gerador está desligado de qualquer carga externa a corrente externa  $I$  é zero e toda a corrente fotovoltaica gerada pela radiação incidente volta pelo diodo. Fazendo  $I = 0$  na equação (3.4) obtemos a tensão no gerador em circuito aberto [2]:

$$V_{oc} = V_T \ln \left( \frac{I_F + I_S}{I_S} \right) \quad (3.6)$$

**b) Gerador fotovoltaico ideal em curto-circuito**

$$I_{SC} = I_F \quad (3.7)$$



*Figura 3.10b Gerador fotovoltaico ideal em curto-circuito*

*Fonte [2]*

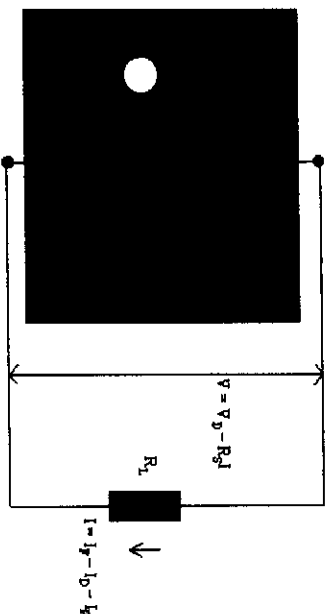
Quando o gerador está em curto circuito (terminais ligados por resistência nula, como na Figura 3.10b) toda a corrente  $I_F$  circula por fora do gerador. Nesse caso, tanto a corrente como a tensão no diodo são nulas. A tensão medida externamente é  $V = 0$ , e a corrente de curto circuito é a corrente fotovoltaica

### **3.4.2 Gerador Fotovoltaico Real**

Num gerador fotovoltaico real existem dois efeitos que precisam ser considerados:

- i) A resistência interna e dos contatos do gerador, que é representada como uma resistência  $R_s$  em série com o gerador, já que ela se opõe à circulação externa da corrente, e

ii) A corrente resistiva através do cristal, representada como uma resistência  $R_p$  em paralelo com o diodo, já que ela representa um outro mecanismo para a circulação interna da corrente [2].



*Figura 3.11 Gerador fotovoltaico real descarregando através de resistência finita*

*Fonte [2]*

A equação que relaciona a corrente externa  $I$  e a diferença de potencial  $V$  sobre o resistor ainda é obtida a partir da equação  $I(V)$  do diodo (3), só que agora as relações entre  $I$  e  $I_D$  (1) e entre  $V$  e  $V_D$  (2) são dadas por

$$I = I_f - I_D - I_p \quad (3.8)$$

e

$$V = V_D - R_s I \quad (3.9)$$

Substituindo as equações (3.8) e (3.9) na equação (3.3), e usando a relação dada pela lei de Ohm entre  $I_p$  e  $V_D$ , obtemos:

$$I = I_f - I_s \left( \exp \left\{ \left( 1 + \frac{R_s}{R_L} \right) \frac{V}{V_T} \right\} - 1 \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_s}{R_L} \right) \frac{V}{R_p} \quad (3.10)$$

### 3.5 Efeitos dos Aparelhos de Medida na Determinação de $I$ e $V$

A Figura 3.12 mostra o efeito dos aparelhos de medida (amperímetro  $A$  e voltímetro  $V$ ) sobre a tensão  $V$  e a corrente  $I$  externas em função da tensão  $V_D$  e a corrente  $I_D$  no diodo no gerador fotovoltaico ideal [2]. O efeito da resistência do amperímetro  $R_A$  é idêntico ao efeito da resistência interna em série  $R_S$  e o efeito da resistência do amperímetro  $R_V$  é o mesmo que o da resistência interna em paralelo  $R_P$  [2].

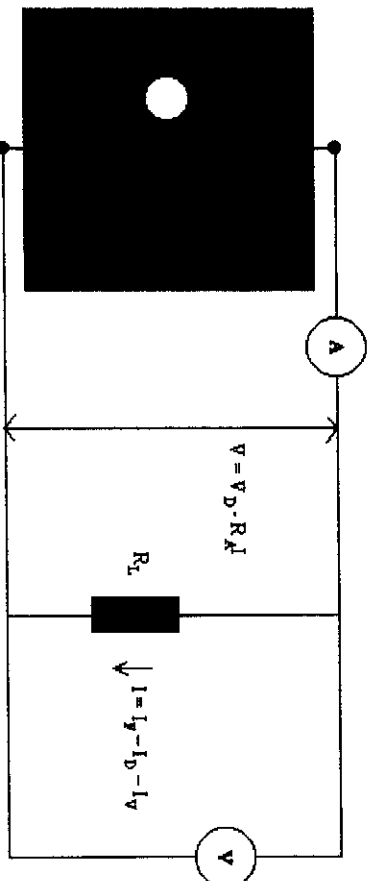
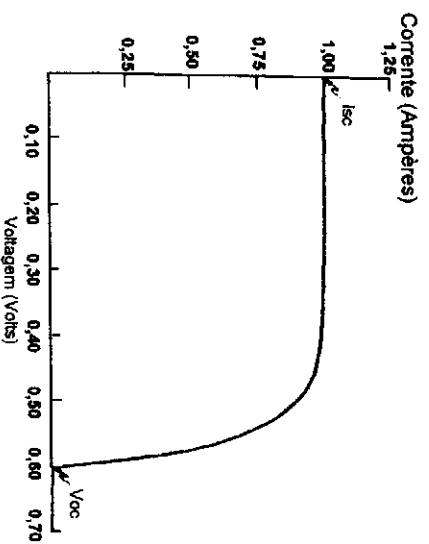


Figura 3.12 Efeito dos medidores de corrente e tensão sobre um gerador fotovoltaico ideal descarregando através de resistência finita

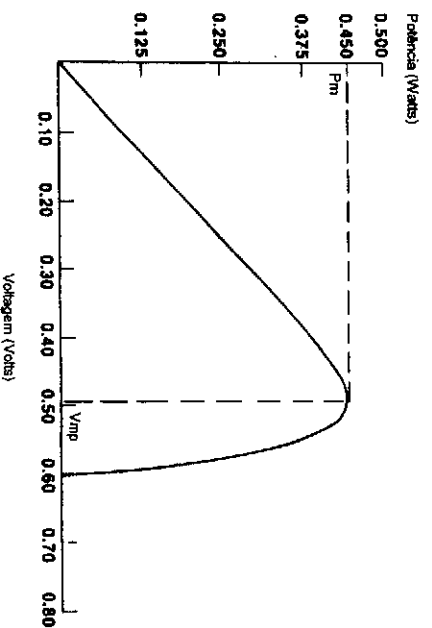
Fonte [2]

Exceptuando-se as questões relativas à acurácia de medidas simultâneas de corrente e tensão, o efeito dos medidores pode ser incorporado ao resultado de equação (3.10) usando-se valores efectivos de  $R_S$  e  $R_P$ [2].

A condição padrão para se obter as curvas características dos módulos é definida para radiação de  $1000\text{W/m}^2$  (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia), e temperatura de  $25^\circ\text{C}$  na célula (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura) [2].



*Figura 3.13 – Curva característica  $I \times V$  mostrando a corrente  $I_{sc}$  e a tensão  $V_{oc}$*   
*Fonte [2]*



*Figura 3.14 – Curva típica de potência versus tensão*  
*Fonte [2]*



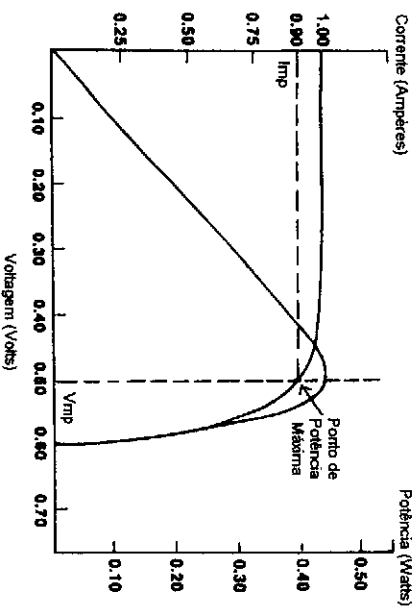


Figura 3.15 – Parâmetros de potência máxima

Fonte [2]

### 3.5.1 Factores que afectam as características eléctricas dos módulos

Os principais factores que influenciam nas características eléctricas de um painel são a *Intensidade Luminosa* e a *Temperatura das Células*. A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da *Intensidade luminosa* [1]. Por outro lado, o aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo caia abaixando assim os pontos de operação para potência máxima gerada.

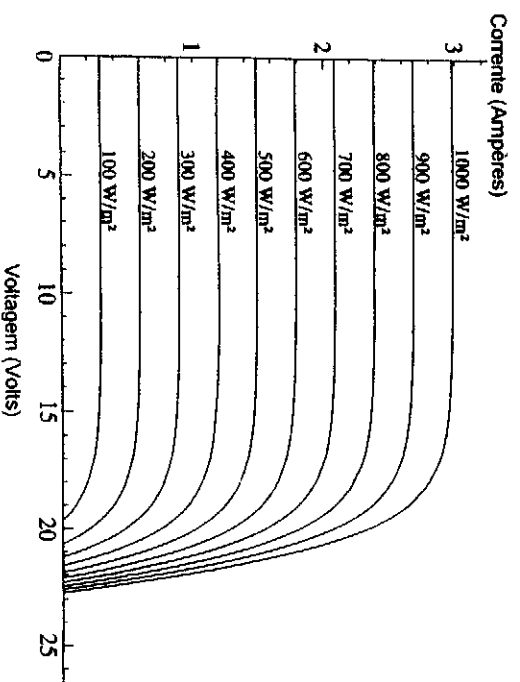
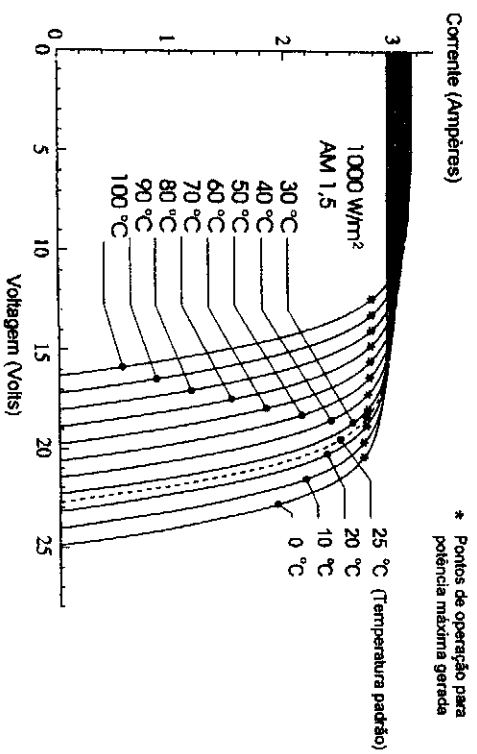


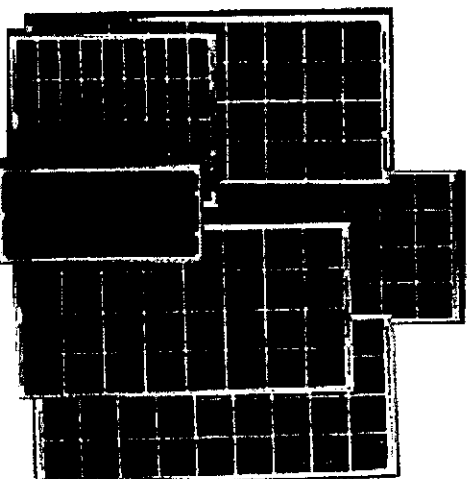
Figura 3.16 – Efeito causado pela variação de intensidade luminosa.

Fonte [2]

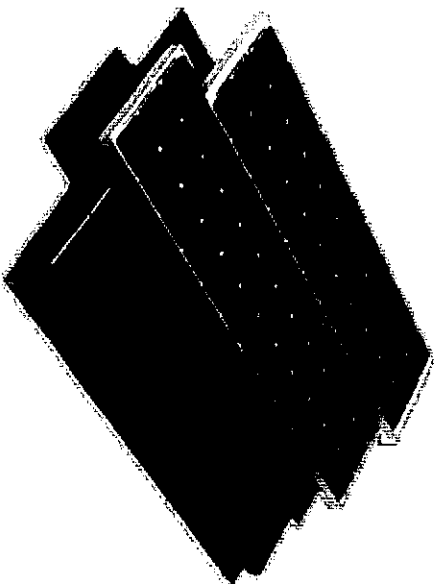


*Figura 3.17 – Efeito causado pela temperatura na célula*  
*Fonte [2]*

### 3.5.2 Alguns modelos de módulos fotovoltaicos



*Figura 3.18 – Módulo fabricado pela empresa Kyosera.*  
*Fonte [2]*

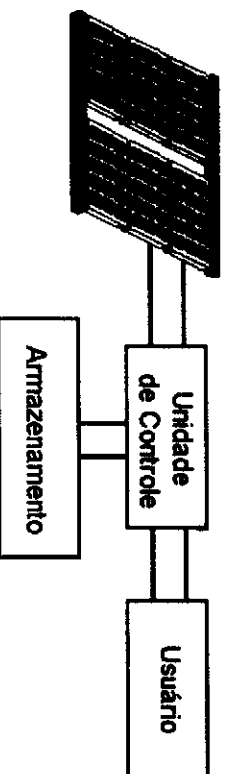


*Figura 3.19 – Módulo fabricado pela empresa Siemens.*

*Fonte [2]*

### **3.6 Componentes de um Sistema Fotovoltaico**

Um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados, híbridos e ligados a rede [1]. Os sistemas obedecem a uma configuração básica onde o sistema deverá ter uma unidade de controle de potência e também uma unidade de armazenamento [1].



*Figura 3.20 – Configuração básica de um sistema fotovoltaico.*

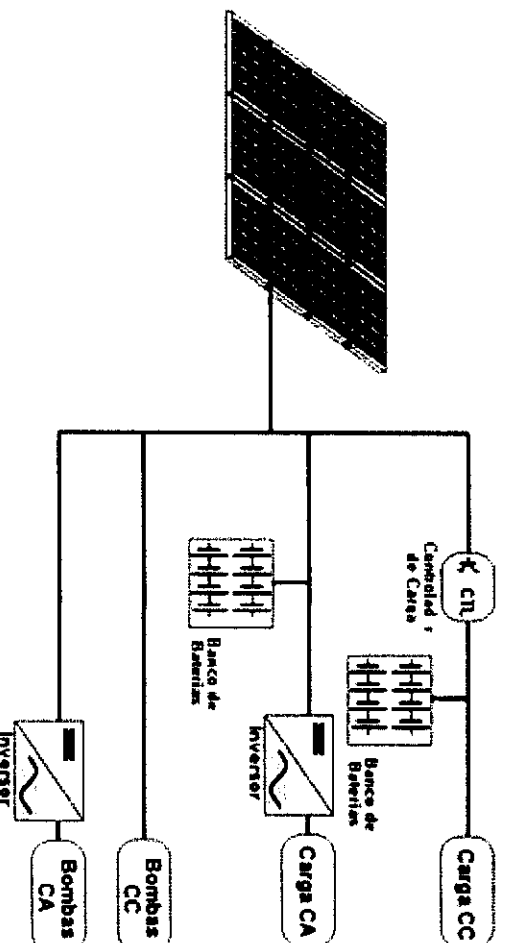
*Fonte [1]*

### 3.6.1 Sistemas Isolados

Para os sistemas isolados, em geral, utiliza-se alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, quando se deseja utilizar aparelhos eléctricos ou armazenar-se na forma de energia gravitacional quando se bombeia água para tanques em sistemas de abastecimento [1]. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, o que é o caso da irrigação onde toda a água bombeada é directamente consumida ou armazenada em reservatórios [1].

Em sistemas que necessitam de armazenamento de energia em baterias, utiliza-se um dispositivo para controlar a carga e a descarga na bateria [1]. O "controlador de carga" tem como principal função não deixar que haja danos na bateria por sobrecarga ou descarga profunda [1]. O controlador de carga é usado em sistemas pequenos onde os aparelhos utilizados são de baixa tensão e corrente contínua (CC).

Para alimentação de equipamentos de corrente alternada (CA) é necessário um inversor. Este dispositivo geralmente incorpora um seguidor de ponto de máxima potência necessário para optimização da potência final produzida. Este sistema é usado quando se deseja mais conforto na utilização de electrodomésticos convencionais [1].



*Figura 3.21 – Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada.*  
Fonte [1]

### 3.6.2 Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos são aqueles que, desligados da rede convencional, apresentam várias fontes de geração de energia como por exemplo: turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos entre outras [1]. A utilização de várias formas de geração de energia eléctrica torna-se complexo na necessidade de optimização do uso das energias [1]. É necessário um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário.

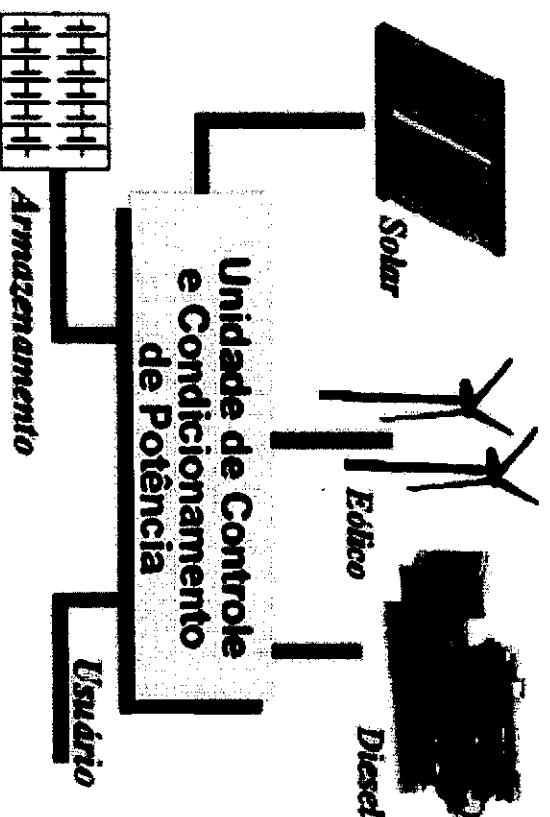


Figura 3.22 – Exemplo de sistema híbrido.  
Fonte [1]

Em geral, os sistemas híbridos são empregados para sistemas de médio a grande porte vindo a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas de corrente contínua, o sistema híbrido também apresenta um inversor [1]. Devido a grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de optimização do sistema torna-se um estudo particular para cada caso.

### 3.6.3 Sistemas Interligados a Rede

Estes sistemas utilizam grandes números de painéis fotovoltaicos, e não utilizam armazenamento de energia pois toda a geração é entregue directamente na rede [1]. Este sistema representa uma fonte complementar ao sistema eléctrico de grande porte ao qual esta ligada [1]. Todo o arranjo é ligado em inversores e logo em seguida guiados directamente na rede. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afectada [1].

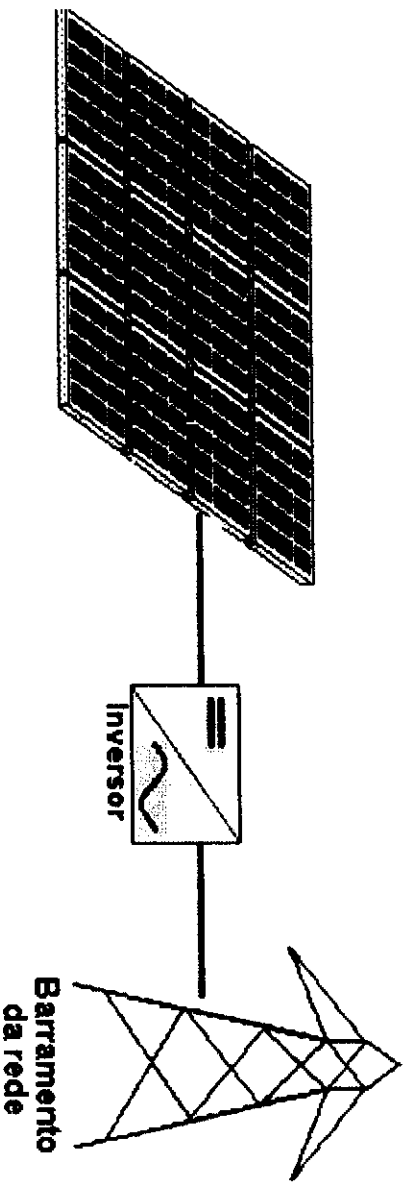


Figura 3.23 – Sistema ligado à rede.  
Fonte [1]

## **CAPÍTULO 4**

### **4 Dimensioamento do Sistema de Bombeamento de Água**

#### **4.1 Introdução**

No caso particular do fornecimento de água para populações rurais, as energias renováveis de geração autónoma, desempenham um papel importante, e tem contribuído ao desenvolvimento social de muitas regiões isoladas em várias partes do mundo. A garantia do suprimento de água, melhorando assim as condições de higiene, reduz a incidência de doenças associadas ao acesso inadequado da mesma, bem como a diminuição da migração humana para outras regiões. Pode-se recordar aqui, o enorme contingente de pessoas que foge do seu lugar de origem em períodos de estiagem, principalmente, em algumas regiões do país. Neste contexto a água tem um papel fundamental, considerando a situação mundial actual que é de mais de 1 bilhão de pessoas sem acesso a água potável.

O êxito no fornecimento de água às populações está directamente associado a disponibilidade de recursos energéticos. Com frequência, as únicas fontes de energia acessíveis às populações carentes para a execução de tal acção são as tracções humana e animal, o que limita muito a oferta do recurso, e em muitos casos torna-se um trabalho escravo, afectando principalmente mulheres e crianças. Sendo assim, a inexistência de rede eléctrica, a irregularidade e os custos do fornecimento de combustível em muitas regiões, motivam a introdução de sistemas de bombeamento baseados em recursos energéticos disponíveis localmente, como podem ser a tecnologia edíca, solar fotovoltaica, pequenas quedas d'água, biomassa, etc. Actualmente a tecnologia fotovoltaica<sup>1</sup>, tema alvo deste trabalho, conta com um alto grau de maturidade o que se reflecte em uma também elevada confiabilidade e eficiência no funcionamento dos sistemas. Concretamente, a geração fotovoltaica tem um excepcional êxito em aplicações onde as exigências em termos de confiabilidade são rigorosas como podem ser em equipamentos de telecomunicações, sinalização e suprimento de água para consumo humano e de animais domésticos.

Quanto a durabilidade, já foi demonstrado que a vida útil do gerador fotovoltaico e da maioria dos componentes é superior a 20 anos e que, apesar de não estarem sendo amplamente aplicadas por uma série de motivos, as normas de engenharia necessárias para um bom funcionamento de sistemas fotovoltaicos já estão bem estabelecidas.

#### **4.2 Metodologia Simplificada de Dimensionamento de Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico**

Em qualquer sistema energético adotado para solucionar o problema do fornecimento de água, o processo de dimensionamento começa com o cálculo básico da potência hidráulica ( $P_H$ ) requerida, para elevar a água a uma certa altura manométrica ( $H_m$ ), uma determinada vazão ( $Q_m$ ). Este cálculo é fundamental para a determinação do tipo e tamanho do sistema.

##### **4.2.1 Metodologia de Cálculo da Energia e da Potência Hidráulica**

A potência hidráulica pode ser calculada directamente a partir da equação (4.1)

$$P_H = 2,725 \cdot Q_m \cdot H_m \quad (4.1)$$

Onde:

$P_H$  – Potência hidráulica (W)

$Q_m$  – Vazão ( $m^3/h$ )

$H_m$  – Altura manométrica (m)

Sendo altura manométrica ( $H_m$ ) dada por:

$$H_m = H_v + h_f + h_e \quad (4.2)$$

Onde:

$H_v$  – Altura vertical (m).

$h_f$  – Perda de carga ao longo da tubulação (m).

$h_e$  – Perda de carga em pontos singulares (m).



A altura vertical ( $H_v$ ) é a soma das alturas dinâmica ( $H_{dt}$ ) e do reservatório ( $H_R$ ). Veja o anexo 1 Figura 4.1.

$$H_v = H_{dt} + H_R \quad (4.3)$$

As perdas de carga na tubulação ( $h_e$ ) e nos pontos singulares ( $h_f$ ) foram obtidas a partir de tabelas 4.1 e 4.2 mostradas no anexo 2.

Também é útil conhecer a energia hidráulica diária necessária para uma determinada demanda de água. Este valor é obtido através da equação 4.4.

$$E_H = 2,725 \cdot Q_d \cdot H_m \quad (4.4)$$

$E_H$  – Energia hidráulica diária (Wh/dia).

$H_m$  – Altura manométrica (m)

$Q_d$  – Vazão (m<sup>3</sup>/dia).

A energia hidráulica é convertida em energia eléctrica requerida ( $E_{bomba}$ )

$$E_{bomba} = \frac{E_H}{\eta_{bomba}} \quad (4.5)$$

#### 4.2.2 Metodologia de Cálculo dos Parâmetros Fotovoltaicos

a) Energia disponível na geração do painel fotovoltaico ( $E_{FV}$ ) em [Wh/dia]

$$E_{FV} = P_{FV} \cdot T_{psc} \quad (4.6)$$

b) Necessidade energética ( $E_{need}$ ) em [Wh/dia]

$$E_{need} = I_{need} \cdot V_{bat} \quad (4.7)$$

A necessidade energética mensal é dada pela seguinte equação:

$$E_{need_{mensal}} = N \cdot E_{need} \quad (4.7.1)$$

Onde:

N – é o número de dias do mês

- c) Total de energia disponível (deve ser maior que a necessidade energética)

$$E_{disp} = n_{PV} \cdot E_{PV} \geq E_{need} \quad (4.8)$$

- d) Corrente gerada nos painéis e nas baterias em [Ah]

$$I_{PV} = \frac{E_{PV}}{V_{PV}} \quad \text{ou} \quad I_{bat}^{disp} = \frac{E_{disp}}{V_{bat}} \quad (4.9)$$

- e) Corrente total necessária em [Ah/dia]

$$I_{tot} = I_{need} \cdot f_R \cdot n_{aut} \quad (4.10)$$

- f) Corrente total mensal necessária para carregar as baterias em [Ah/mês]

$$I_{tot\,mensal} = I_{tot} \cdot n_{dias} + I_{tot} \quad (4.11)$$

- g) Área ocupada pelos painéis em [m<sup>2</sup>]

$$A_{tot} = n_{PV} \cdot A_{PV} \quad (4.12)$$

Para painéis rectangulares a equação (4.12) fica:

$$A_{tot} = n_{PV} \cdot A_{PV} = n_{PV} \cdot l_{PV} \cdot b_{PV}$$

- h) Condição a cumprir no projecto de para o cálculo de números de painéis

$$n_{PV} = \frac{I_{tot}^{need}}{I_{PV}} \quad (4.13)$$

- i) Potência máxima requerida

$$P_{max} = \frac{P_{med}}{f_{carga}} = \frac{E_{need}}{N \cdot f_{carga}} \quad (4.14)$$

## j) Cálculo do número de baterias

$$n_{bat} = \frac{I_{need_{car}}}{I_{bat}} \quad (4.15)$$

## k) Tempo total de carregamento das baterias

$$t_{curr} = \frac{I_{need_{car}}}{n_{FV} \cdot I_{FV}} \quad (4.16)$$

## l) Saldo energético mensal em [Ah/mês]

$$\Delta E_{mensal} = n_{FV} \cdot I_{FV} - I_{need} \quad (4.17)$$

## m) Saldo energético anual em [Ah/mês]

$$\Delta E_{anual} = 4 \cdot \sum_{i=1}^{i=4} 3 \cdot \Delta E \quad (4.18)$$

## 4.2.3 Tratamento de Dados

Todos os cálculos incluindo os dados de partida estão mostrados no anexo 3.

## **5 Conclusão**

A partir dos cálculos efectuados durante a realização do trabalho, verifica-se que para o fornecimento de água a esta população é necessário o uso de 18 painéis e um total de 19 baterias.

O abastecimento de água é um problema ainda não resolvido para uma grande parcela da população mundial, principalmente em Moçambique, que é um país em franco desenvolvimento.

Tendo em vista que o abastecimento de água está directamente relacionado com o acesso a energia, e que, principalmente para as populações rurais isoladas, a extensão da rede eléctrica é onerosa e encontra inúmeros entraves, as formas de geração autónoma de energia podem contribuir significativamente para a solução deste problema em muitos casos.

No enfoque deste trabalho de bombeamento de água com a tecnologia solar fotovoltaica, fez-se uma descrição pormenorizada dos componentes de um sistema típico de bombeamento, com a finalidade de propiciar um maior entendimento ao leitor, da tecnologia envolvida com esta opção.

Quanto ao dimensionamento, a escolha de uma metodologia simplificada teve como objectivo principal, torná-la acessível aos actores técnicos da extensão rural, os quais tem um papel fundamental na disseminação de novas tecnologias aplicadas ao campo.

---

## 6 REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- [1] John Twidell and Tony Weir "Renewable Energy Resources", E and FN SPON, 1996
- [3] B. C Cuamba "Módulo Sobre Energias Renováveis" Universidade Eduardo Mondlane, 2006
- [6] Duffie, J. A.; Beckman, W.A (1991) "Solar Engineering of Thermal Processes" John Wiley and Sons, New York

## ENDEREÇOS ELECTRÓNICOS

- [2] [www.aondevamos.eng.br/textos08.htm](http://www.aondevamos.eng.br/textos08.htm) 28/03/06
- [4] [www.cresesb.cepel.br/tutorial/solar/apstenergiasolar.htm#item-2](http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/solar/apstenergiasolar.htm#item-2) 23/02/06
- [5] <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmetec/cap1/index.html> 20/02/06

## ANEXO I

**ANEXO II**





**Tabela 4.2 Coeficiente K de perda de carga para várias conexões**

<b>Conexões</b>	<b>K</b>
Válvula esférica (totalmente aberta)	10
Válvula angular (totalmente aberta)	5
Válvula de retenção (totalmente aberta)	2,5
Válvula gaveta (totalmente aberta)	0,19
Curva de raio curto	2,2
T comum	1,8
Cotovelo comum	0,9
Cotovelo de raio médio	0,75
Cotovelo de raio longo	0,6

**Tabela 4.3 Características do poço**

<b>Local do Furo</b>	<b>Profundidade Do furo (m)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Aquífero</b>	<b>Nível Estático (m)</b>	<b>Nível Dinâmico (m)</b>	<b>Profundidade De imersão Da bomba (m)</b>
Mbenhe Lat: 24° 3 Lon: 35°	84	1	72.3 - 82	50.85	58.85	75

**ANEXO III**

Tabela 4.4 Características do painel

Module type	Sheet SMD-11	Sheet SMD-5	Sheet SMD110-12	Sheet SMD110-24	Sheet SP70
Cell Characteristics					
Cells/cings	1	1	2	1	1
Number of cells	33	36	72	72	36
Cell type	Mono-crystalline	Mono-crystalline	Mono-crystalline	Mono-crystalline	Mono-crystalline
Cell dimensions	103 x 103 (mm)	103 x 103	103 x 103	103 x 103	125 x 125
Electrical Characteristics					
Peak power (Pmp)	50 (W)	55	110	110	70
Peak power voltage (Vmp)	15.9 (V)	17.4	17.5	35.0	16.5
Open circuit voltage (Voc)	19.8 (V)	21.7	21.7	43.5	21.4
Short circuit current (Is)	3.35 (A)	3.45	6.9	3.45	4.7
Maximum system voltage (Vsys. max)	820 (V)	820	820	820	820
Nominal voltage	12 (V)	12	12	24	12
Physical Characteristics					
Length	1220 (mm)	1293	1316	1316	1200
Width	329 (mm)	329	660	660	527
Depth including junction box	35 (mm)	35	54	54	56
Depth excluding junction box	35 (mm)	35	40	40	34
Weight	5.2 (kg)	5.5	11.5	11.5	7.6
Junction box	ProCharger™-S	ProCharger™-S	Spekberg	Spekberg	ProCharger™-CR
Connection type	screws	screws	cage clamp	cage clamp	screws
Mechanical mount	mounting holes	mounting holes	mounting holes	mounting holes	mounting holes
Mounting bolts included	no	no	no	no	no
Certificates					
	IEC61215	IEC61215	IEC61215	IEC61215	IEC61215
	UL-Listing 1703	UL-Listing 1703			UL-Listing 1703
	TUV/IsolationClassII	TUV/IsolationClassII	TUV/IsolationClassII	TUV/IsolationClassII	TUV/IsolationClassII
					FM
Limited Peak Power Warranty					
(years)	25	25	25	25	25
Typical Applications			Grid	Grid	Grid/Industrial
	Barney Charging	Rural/Industrial			

Power specifications are at Standard Test Conditions (STC): irradiance level 1000W/m<sup>2</sup>, spectrum AM 1.5 and cell temperature 25°C.  
For more information please see the applicable Sheet Solar Product Information Sheets.